

Фестиваль науки 2016



Гравітаційні хвилі: слухаємо голос Всесвіту

*Скоренький Юрій Любомирович
кафедра фізики Тернопільського національного
технічного університету ім. І. Пулюя*



Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя
кафедра фізики

Скоренький Ю.Л., Крамар О.І., Довгон'ятий Ю.М.

Найновіші експерименти з загальної теорії відносності

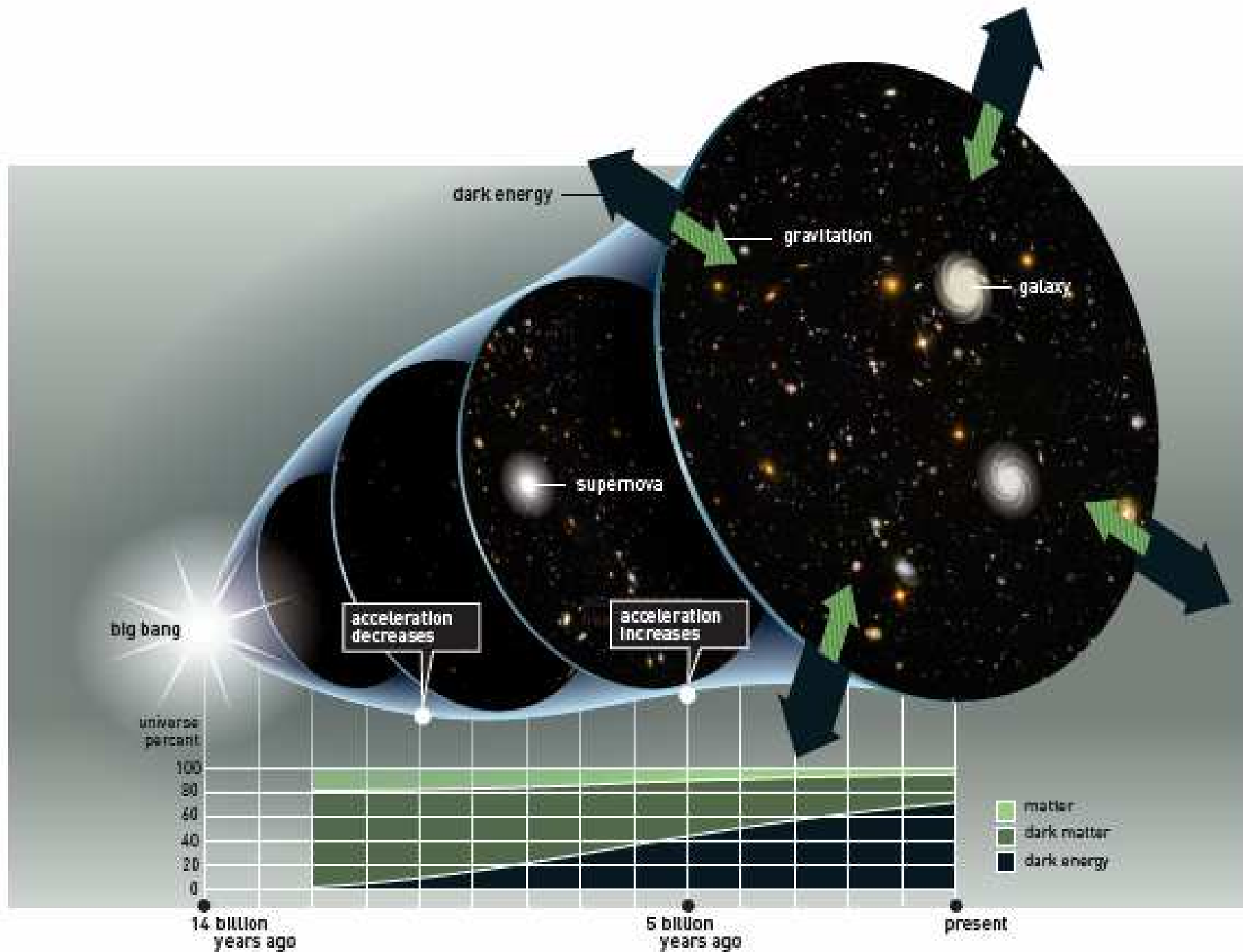


Детектування гравітаційних хвиль в експериментах:

- GEO600
- TAMA
- LIGO
- VIRGO
- LISA



Експерименти з перевірки ефекту Лензе-Тірінга
(завихрення простору-часу поблизу масивного
об'єкта, який обертається)



Відкриття в теорії гравітації та загальній теорії відносності

1583, Галілей; 1665, Ньютон;

- 1583 – Галілео Галілей отримав експериментально формулу для періоду коливань маятника
- 1604 - Галілео Галілей провів експерименти з похилою площиною та ввів закон падіння тіла
- 1607 - Галілео Галілей отримав математичне формулювання закону падіння тіл
- 1640 – Ізмаїл Буліальдус запропонував закон обернених квадратів для сили гравітаційної взаємодії
- 1665 – Ісаак Ньютон ввів універсальний закон гравітаційного притягання тіл і застосував його до пояснення орбіти Місяця та параболічних траєкторій тіл
- 1684 - Ісаак Ньютон довів, що закон гравітаційної взаємодії приводить до законів Кеплера для руху планет

Відкриття в теорії гравітації та загальній теорії відносності

1583, Галілей; 1665, Ньютон;

- 1787 – П'єр-Симон Лаплас розрахував радіус тіла, гравітація якого би не дозволила світлу його покинути
- 1798 – Генрі Кавендіш виміряв гравітаційну сталу
- 1846 – Урбан Левер'є та Джон Адамс, досліджуючи орбіту Урану, незалежно довели, що мусить існувати ще одна планета. Нептун був відкритий у передбаченому місці
- 1855 – Левер'є виявив, що перигелій орбіти Меркурію обертається на 35 кутових секунди на століття
- 1876 – Вільям Кліффорд припустив, що рух матерії може бути зумовлений змінами геометрії простору
- 1882 – Саймон Ньюкомб встановив, що швидкість обертання перигелію Меркурія є 43 кутові секунди на століття
- 1887 – експеримент Альберта Майкельсона та Едварда Морлі не виявив руху ефіру

Відкриття в теорії гравітації та загальній теорії відносності

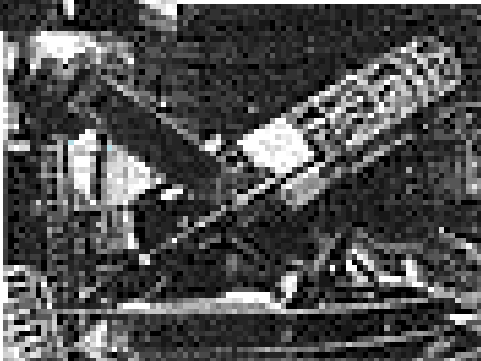
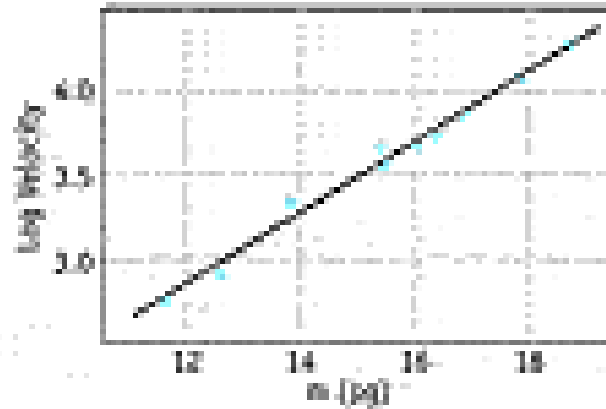
1583, Галілей; 1665, Ньютон; 1915, Ейнштейн

- 1898 – Анрі Пуанкаре вказав на відносність одночасності
- 1904 – Анрі Пуанкаре сформулював принцип відносності для електромагнетизму
- 1905 – Альберт Ейнштейн опублікував спеціальну теорію відносності та показав, що $E=mc^2$
- 1915 – Альберт Ейнштейн опублікував загальну теорію відносності (ЗТВ) і пояснив обертання перигелію Меркурія
- 1916 – Альберт Ейнштейн показав, що польове рівняння загальної теорії відносності допускає хвильові розв'язки
- 1916 – Карл Шварцшильд запропонував розв'язок рівнянь ЗТВ, який може характеризувати чорну діру
- 1919 – Артур Едінгтон спостерігав гравітаційне відхилення світла Сонцем

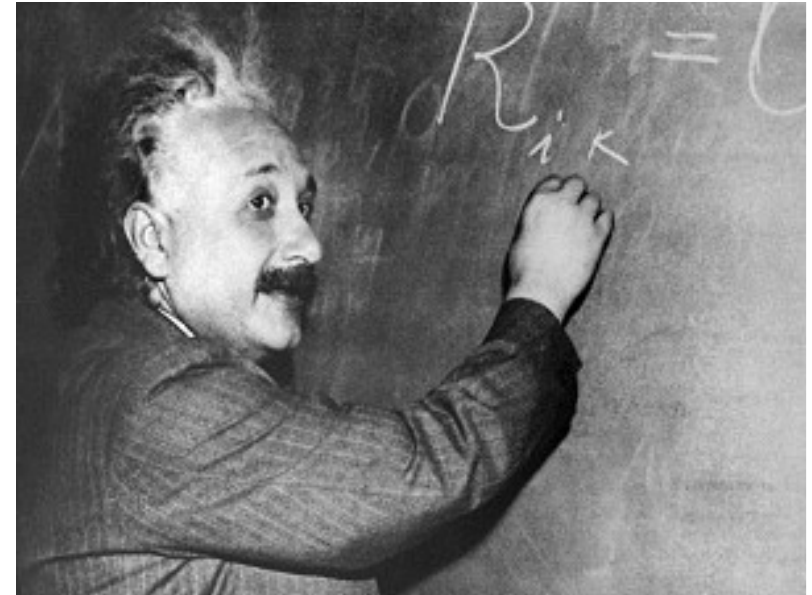
DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE



Edwin Hubble



Mt. Wilson
100 Inch
Telescope



The current Planck Mission results show the Hubble Constant to be 67.80 ± 0.77 (km/sec)/Mpc.

Відкриття в теорії гравітації та загальній теорії відносності

1583, Галілей; 1665, Ньютон; 1915, Ейнштейн

- 1922 – Олександр Фрідман теоретично показав можливість нестационарного розв'язку рівнянь Загальної теорії відносності
- 1927 – Жорж Леметр незалежно отримав нестационарні розв'язки рівнянь ЗТВ
- 1929 – Едвін Габбл виявив лінійну залежність червоного зсуву галактик від відстані до них
- 1937 – Фріц Цвікі висунув гіпотезу, що галактики можуть діяти як гравітаційні лінзи
- 1957 – Джон Віллер показав порушення ЗТВ поблизу сингулярностей та потребу в квантовій теорії гравітації
- 1964 – Ірвін Шапіро передбачив затримку руху світлового імпульса внаслідок дії гравітації (зафіксована ним же в 1968)

Відкриття в теорії гравітації та загальній теорії відносності

1583, Галілей;

1665, Ньютон;

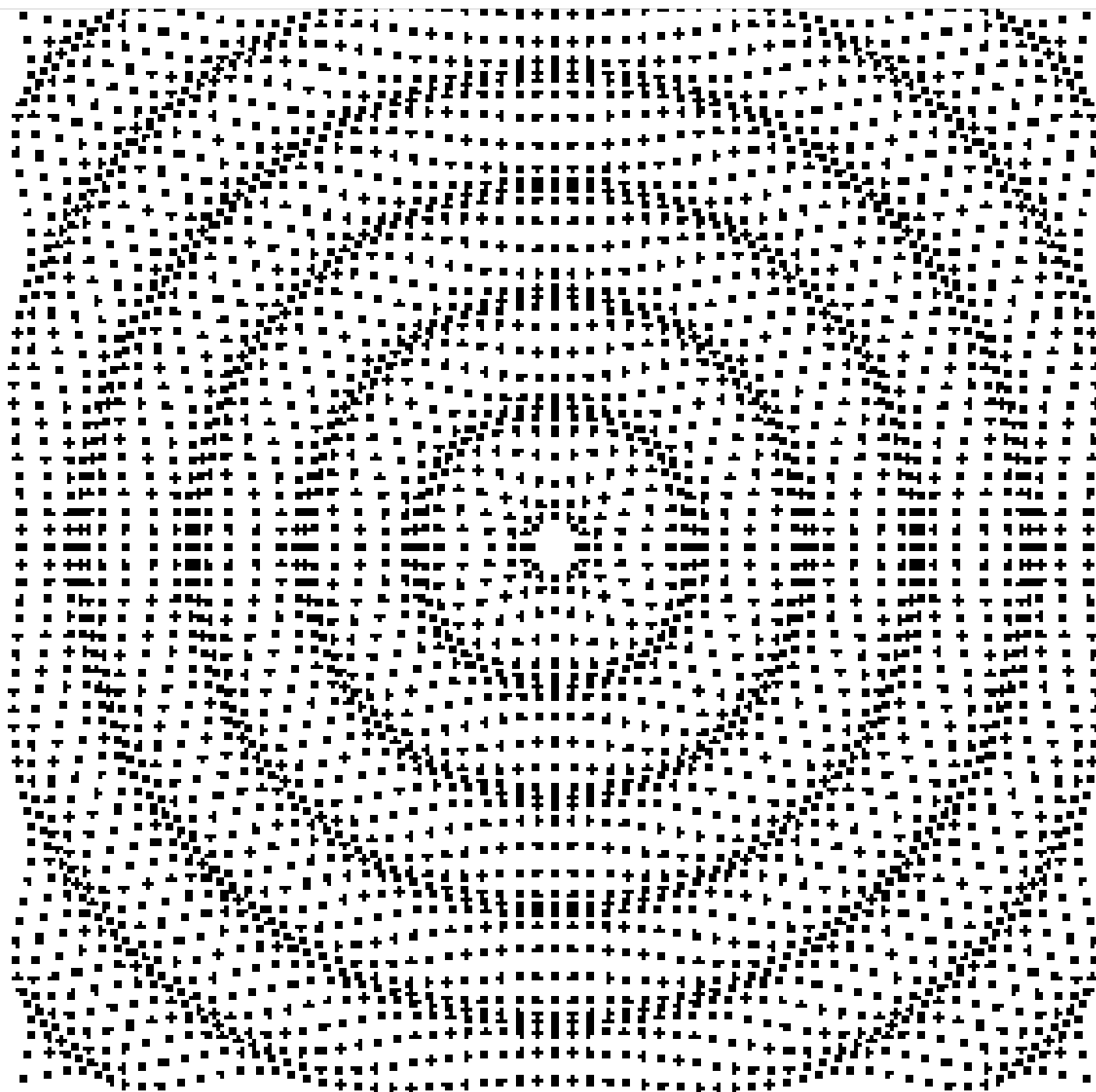
1915, Ейнштейн

1969 – Джозеф Вебер запустив у дію перший детектор гравітаційних хвиль

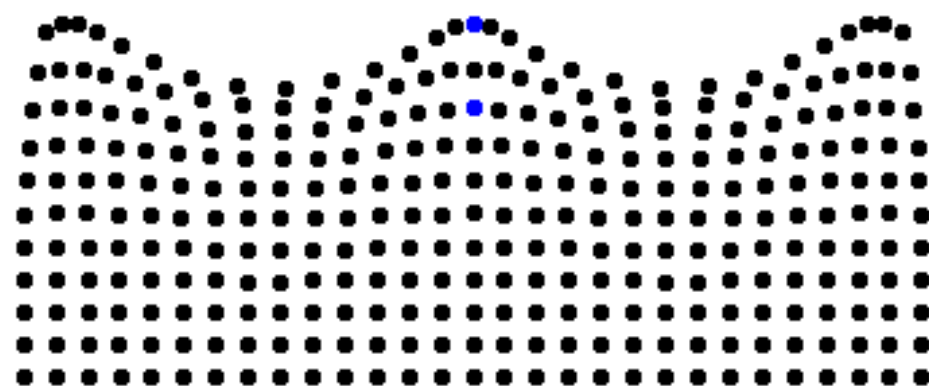
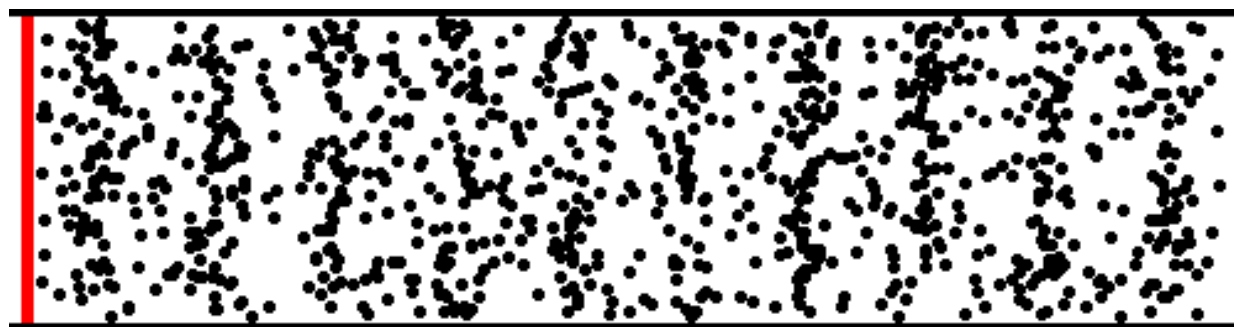
- 1976 – Роберт Весот та Мартін Левін зафіксували гравітаційний червоний зсув з точністю до 0,007%
- 1978 – Рассел Халс та Джозеф Тейлор відкрили пульсар нового типу, що дало нові можливості у вивченні гравітації (Нобелівська премія 1993 р.)
- 1979 – Деніс Волш, Роберт Карсвел та Рей Вейман відкрили квазар Q0957+561, на який галактика діє як гравітаційна лінза
- 1992 – з ініціативи Кіпа Торна, Рональда Дрівера та Райнера Вайса розпочався проект LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)
- 1993 – засновано міжнародний науковий проект VIRGO

Звуки?

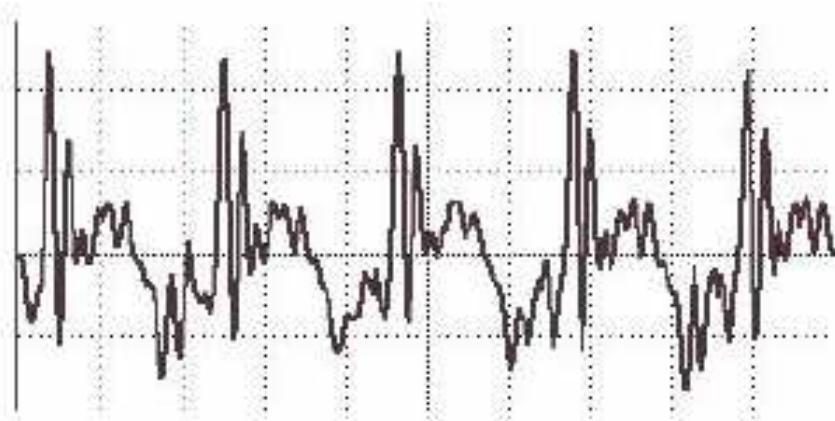




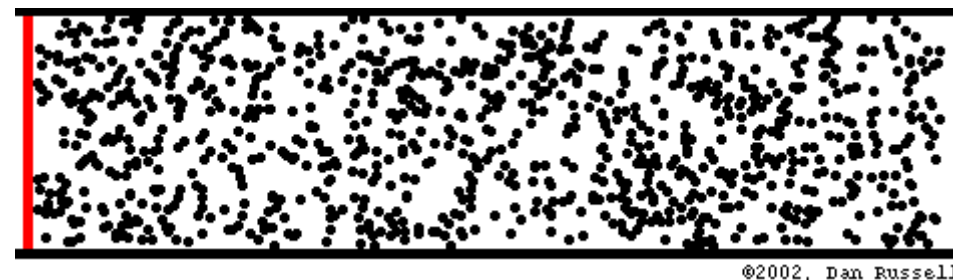




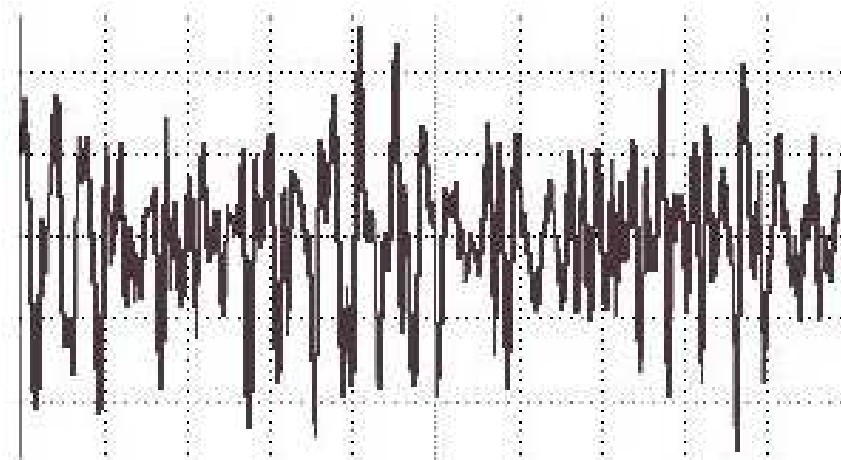
Звукові хвилі



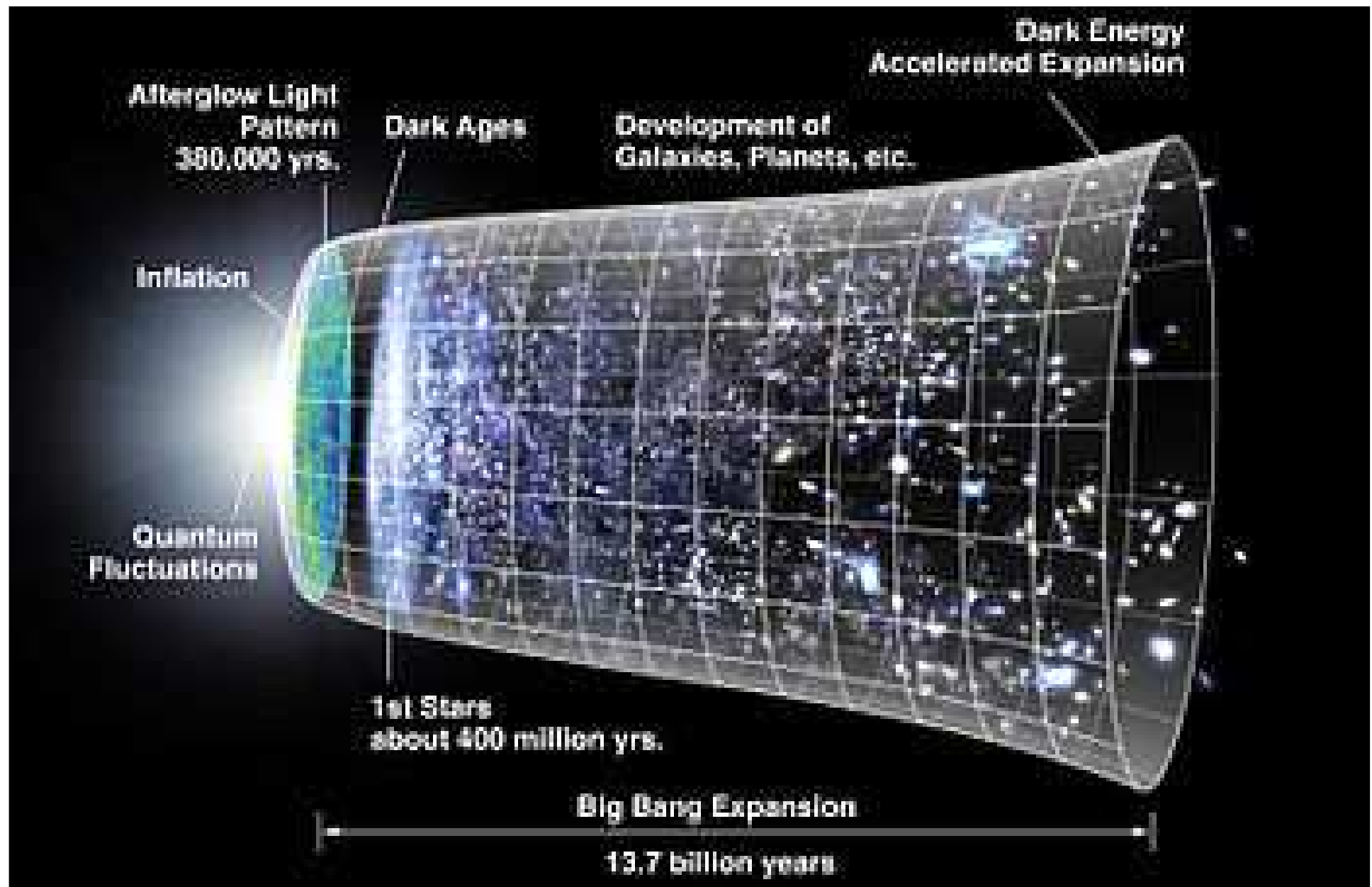
m / A graph of pressure versus time for a periodic sound wave, the vowel “ah.”

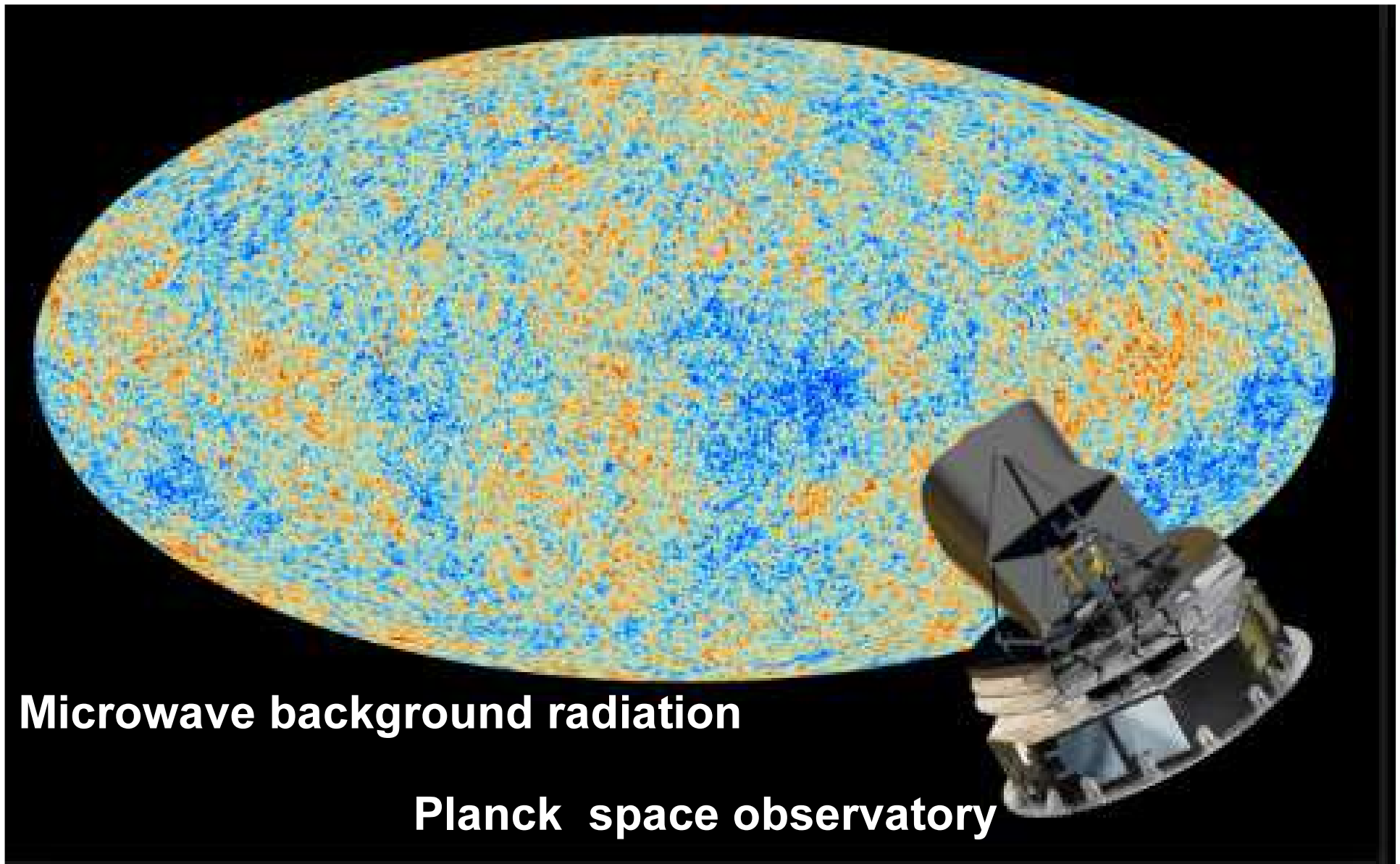


©2002, Dan Russell



n / A similar graph for a non-periodic wave, “sh.”

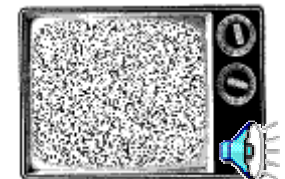


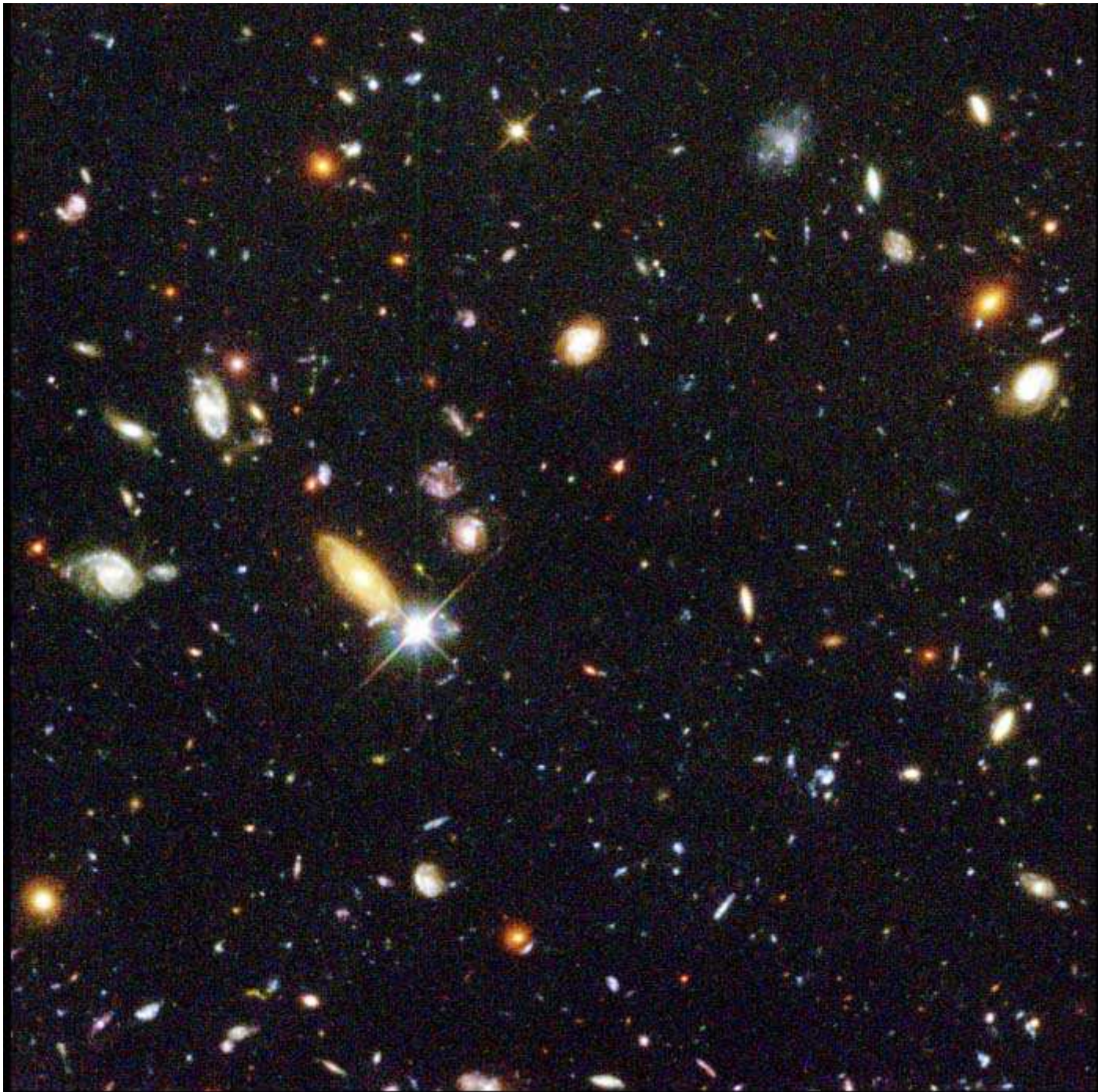


Microwave background radiation

Planck space observatory

The Sound of the Big Bang
John G. Cramer
Professor of Physics
University of Washington





Hubble Deep Field

HST • WFPC2

Джерелами гравітаційних хвиль є:

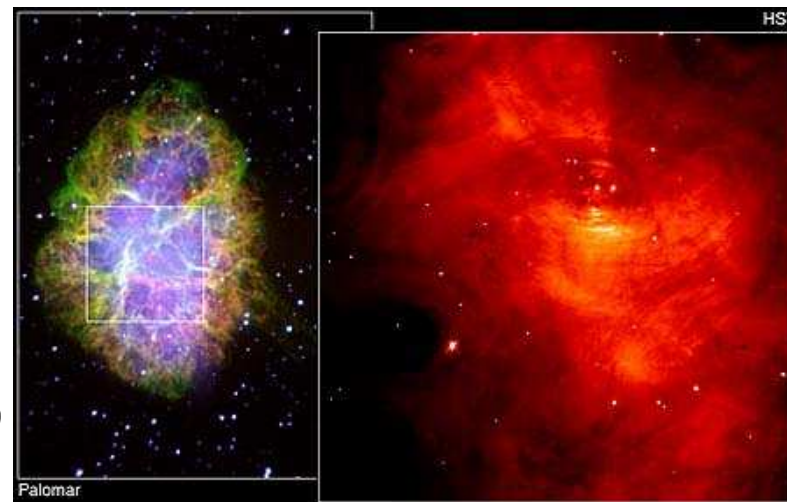
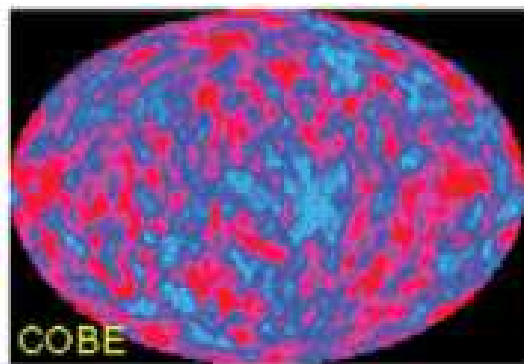
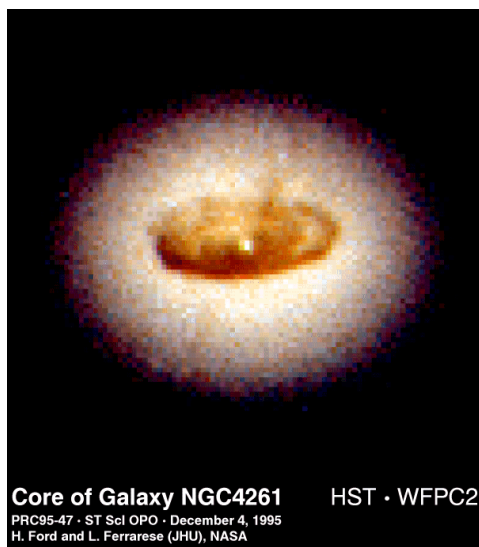
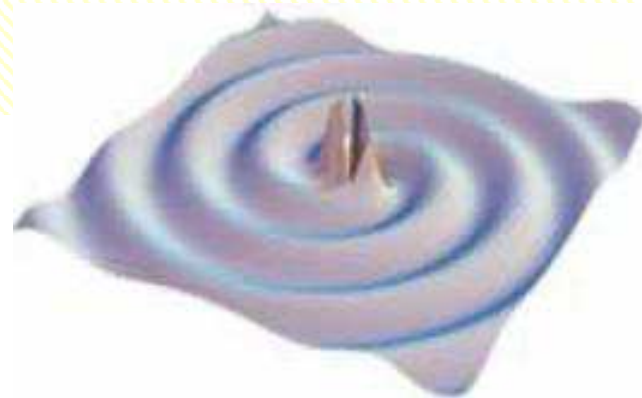
подвійні зірки,

вибухи наднових,

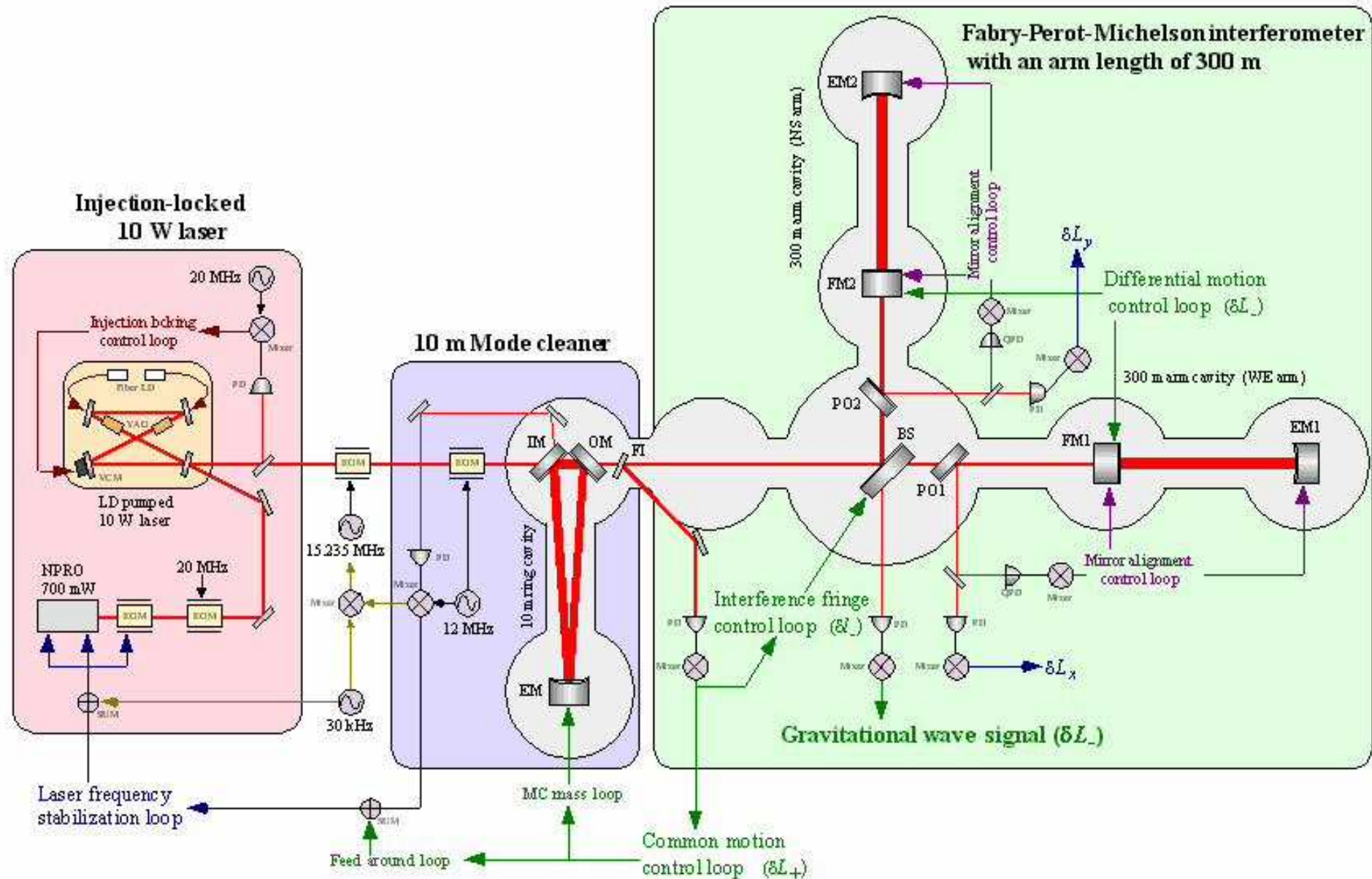
чорні діри які
поглинають масивні
об'єкти чи осцилюють

нейтронні зірки, які
обертаються

Великий вибух
(реліктові гравітони)



Спроби виявлення гравітаційних хвиль: лазерні інтерферометри



Спроби виявлення гравітаційних хвиль: технологічні проблеми



Глибокий вакуум ($<10^{-6}$ Па)

Лазери постійної дії з потужністю порядку десятків Вт та надзвичайно вузьким частотним діапазоном;



Дзеркала найвищої якості, коефіцієнт відбивання яких відрізняється від одиниці лише на кілька мільйонних;



Надійна ізоляція від сейсмічних хвиль;

Фільтрація шумів, яка дозволяє виділити сигнал у 100 разів слабший, ніж інструментальний шум



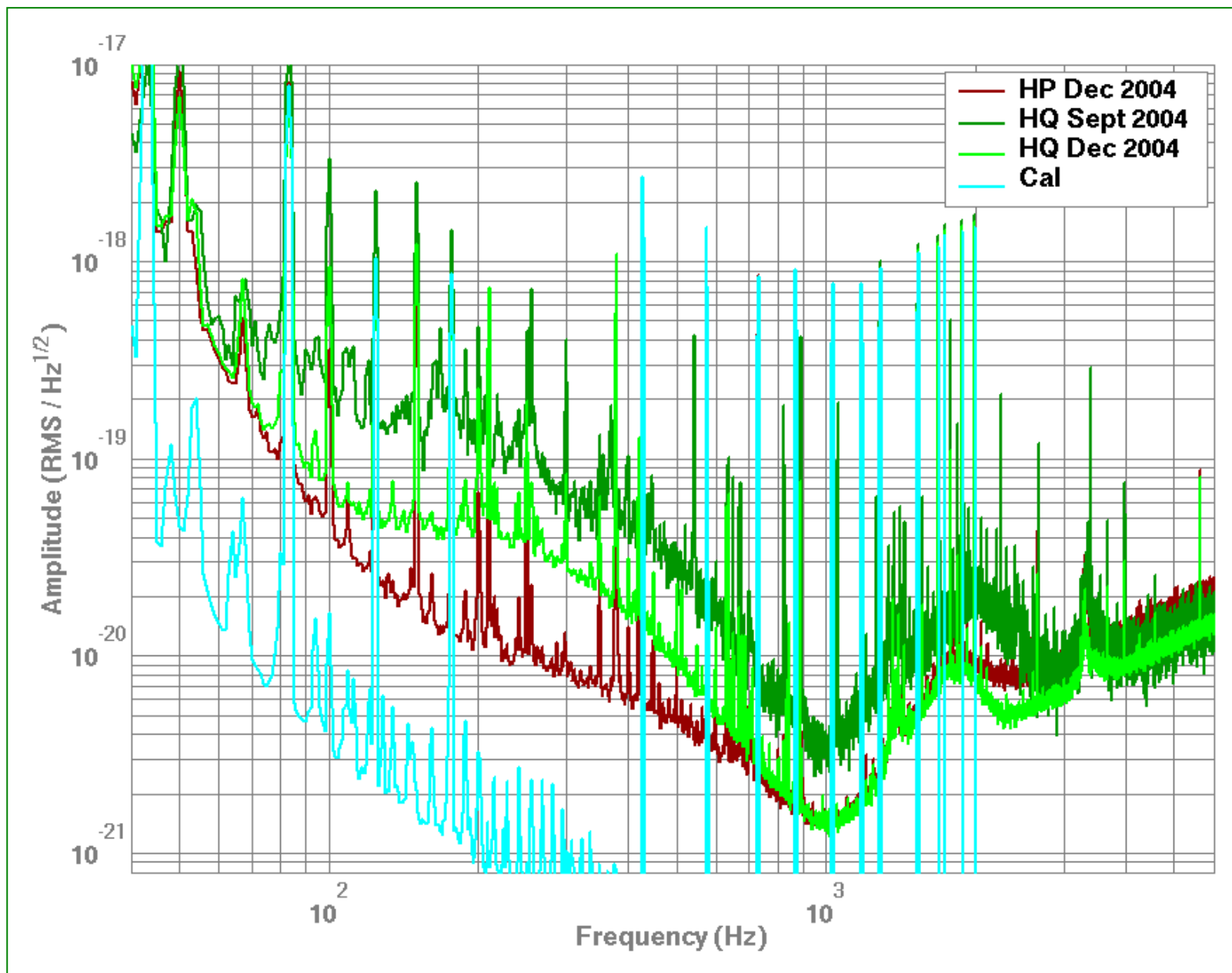
•Проект GEO (Німеччина – Велика Британія)

- 1975 у Макс-Планк-Інституті астрофізики в Мюнхені почав діяти лазерний інтерферометр з плечем довжиною 3 м
- 1977 в університеті Глазго – інтерферометр з плечем 10 м
- 1983 у Макс-Планк-Інституті квантової оптики у Гарчінгу – інтерферометр з плечем 30 м
- 1985-89 об'єднання двох груп у проект GEO, план інтерферометра з плечем у 3 км
- 1995 початок будови інтерферометра GEO 600 з плечем у 600 м
- 2002 перший запуск GEO 600



Чисельна обробка, виділення сигналу з шуму – група з Кардіфф

Дані GEO 600



•Проект ТАМА (Японія)



Організатори:

NAO(National Astronomical Observatory).

ICRR(The Institute for Cosmic Ray Reserch).

The University of Tokyo.(Tsubono group) (Mio group)

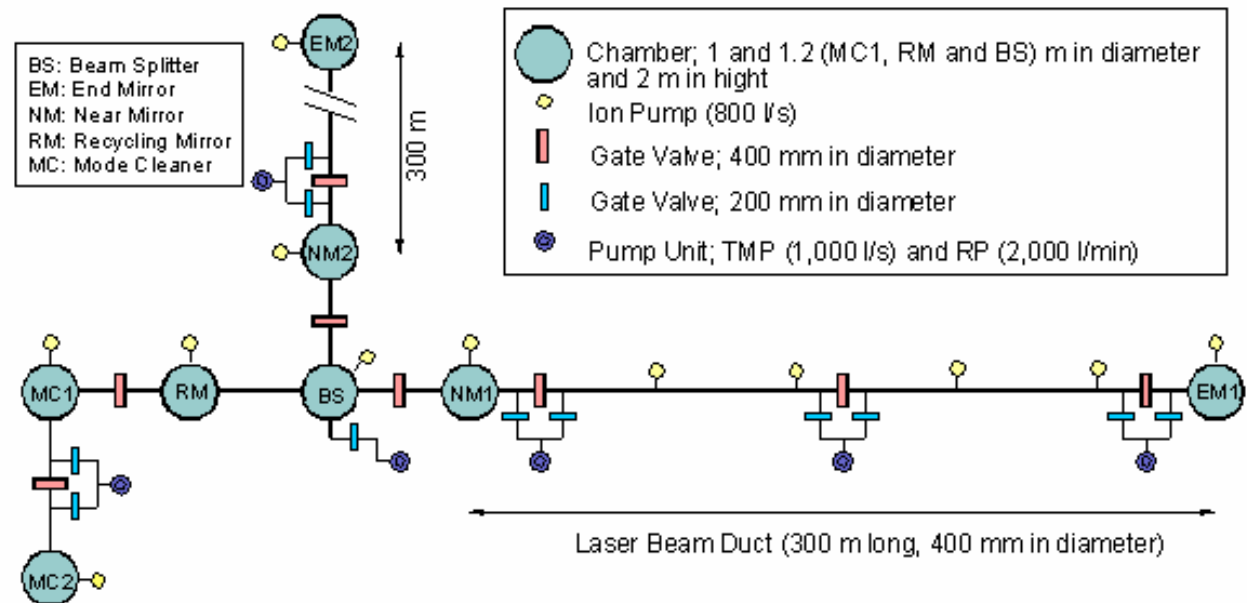
ILS(Institute for Laser Science).

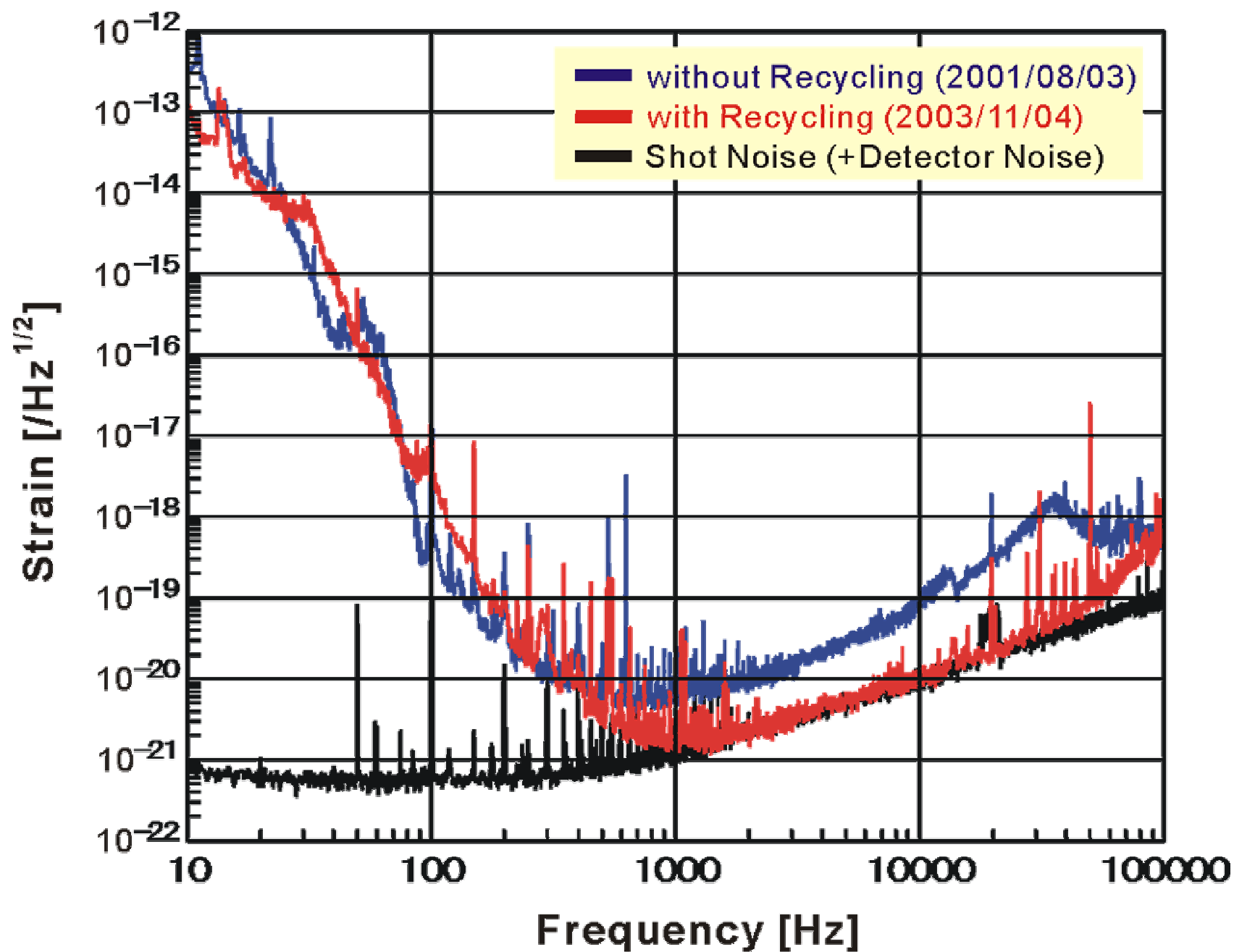
KEK(High Energy Accelerator Research Organization).

YITP(Yukawa Institute for Theoretical Physics).

MUE(Miyagi University of Education)

Інтерферометр Фабрі-Перо з плечима 300 м, лазер потужністю 10 Вт





European Gravitational Observatory

•Проект VIRGO (Італія-Франція)

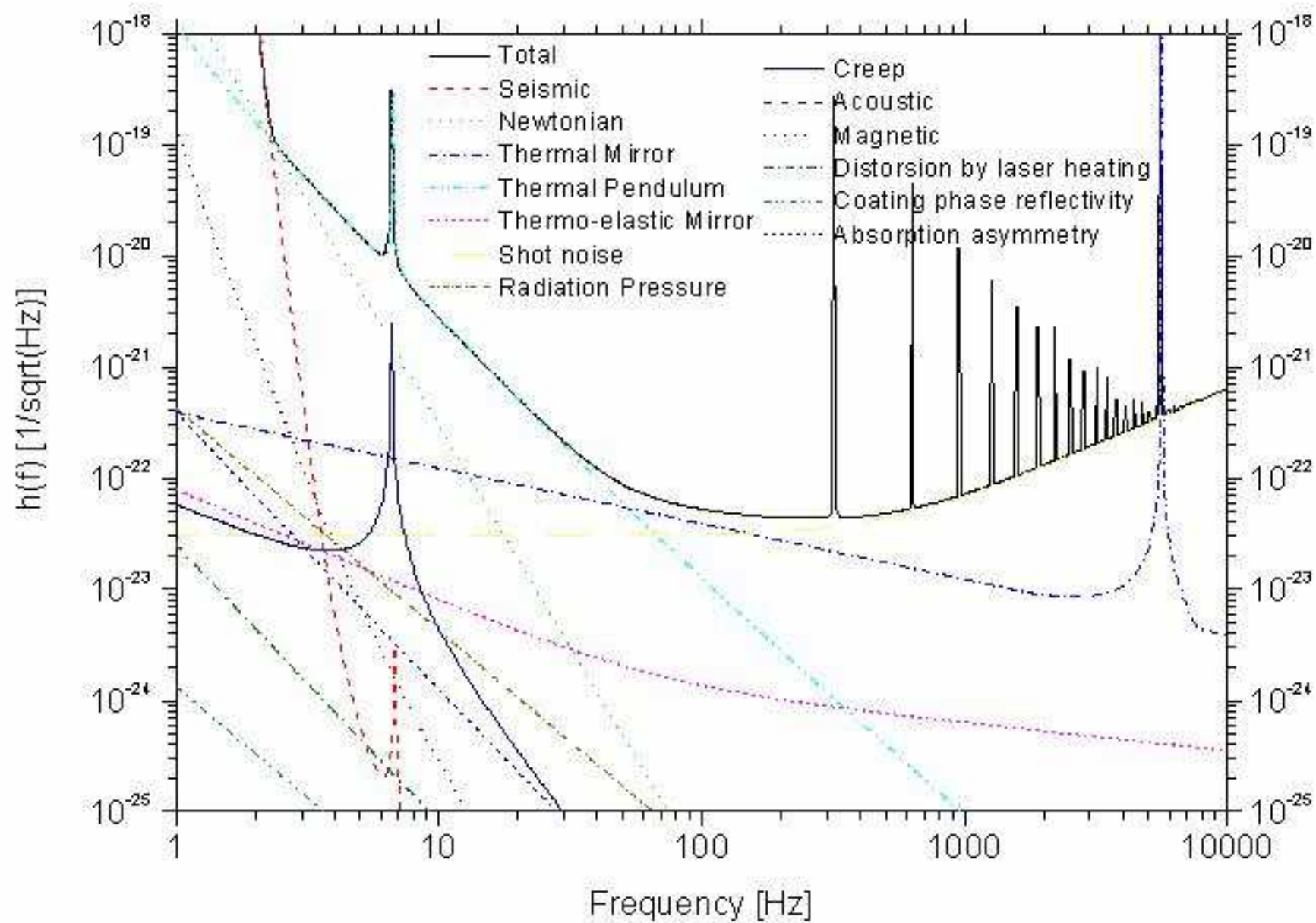
**Інтерферометр Майкельсона з
плечима довжиною по 3 км.
Багаторазові відбивання дозво-
ляють збільшити ефективний
оптичний шлях до 120 км**



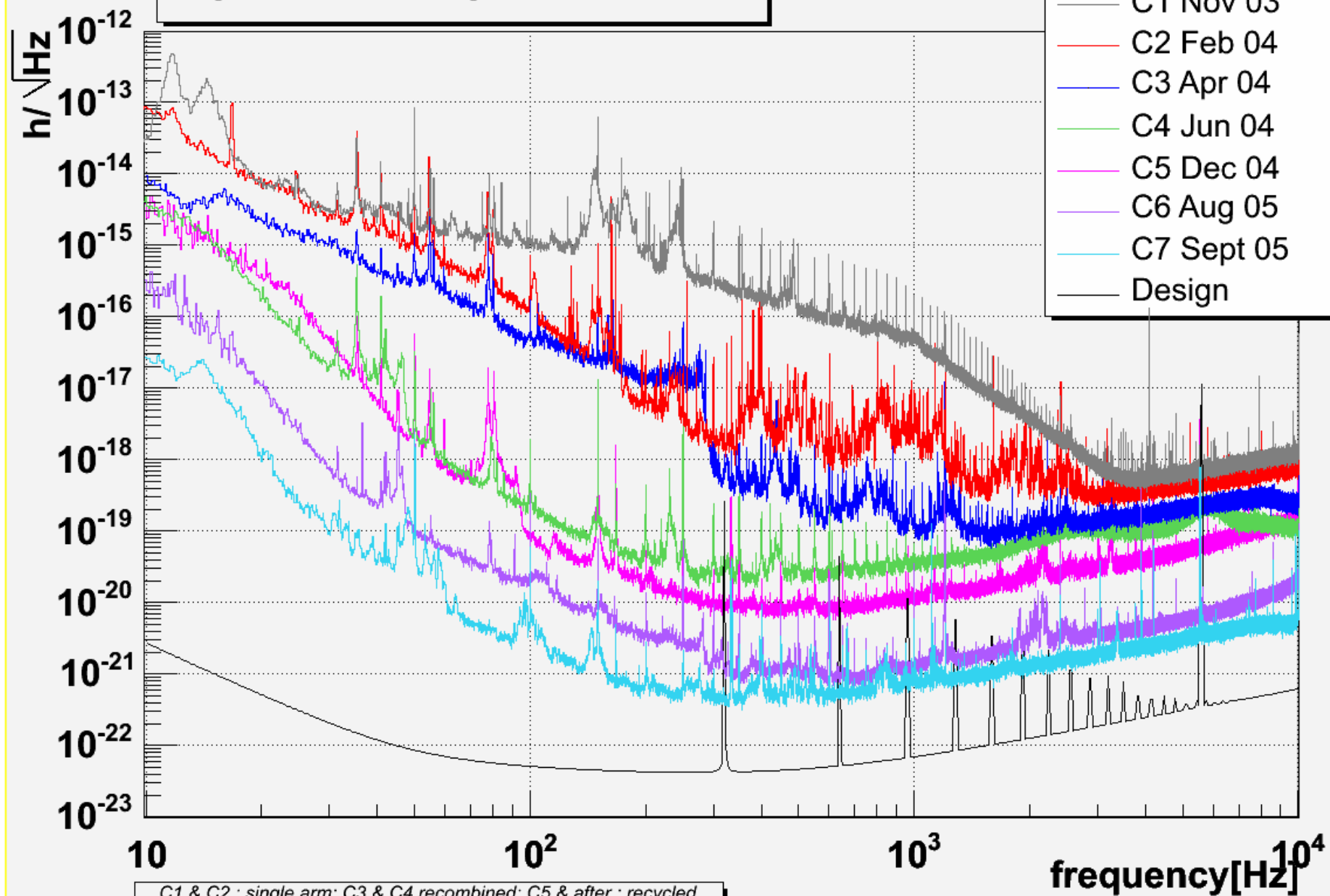
Частотний діапазон від 10 до 6,000 Гц має дозволити виявити хвилі від наднових та подвійних систем у Чумацькому шляху та інших галактиках



**Переріз пучка (3 мм - 20 мм)
Лазер CTF 10 Вт - 20 Вт
Дзеркала 144 мм**



Virgo Commissioning Runs Sensitivities

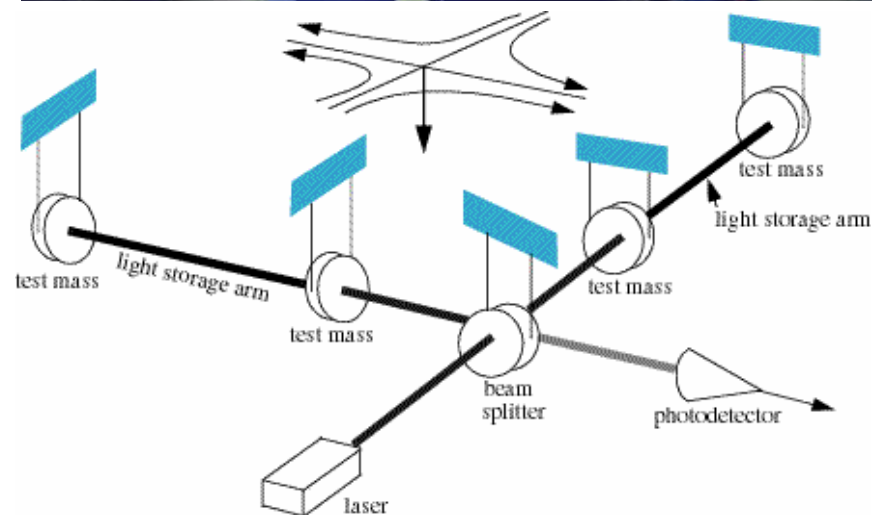


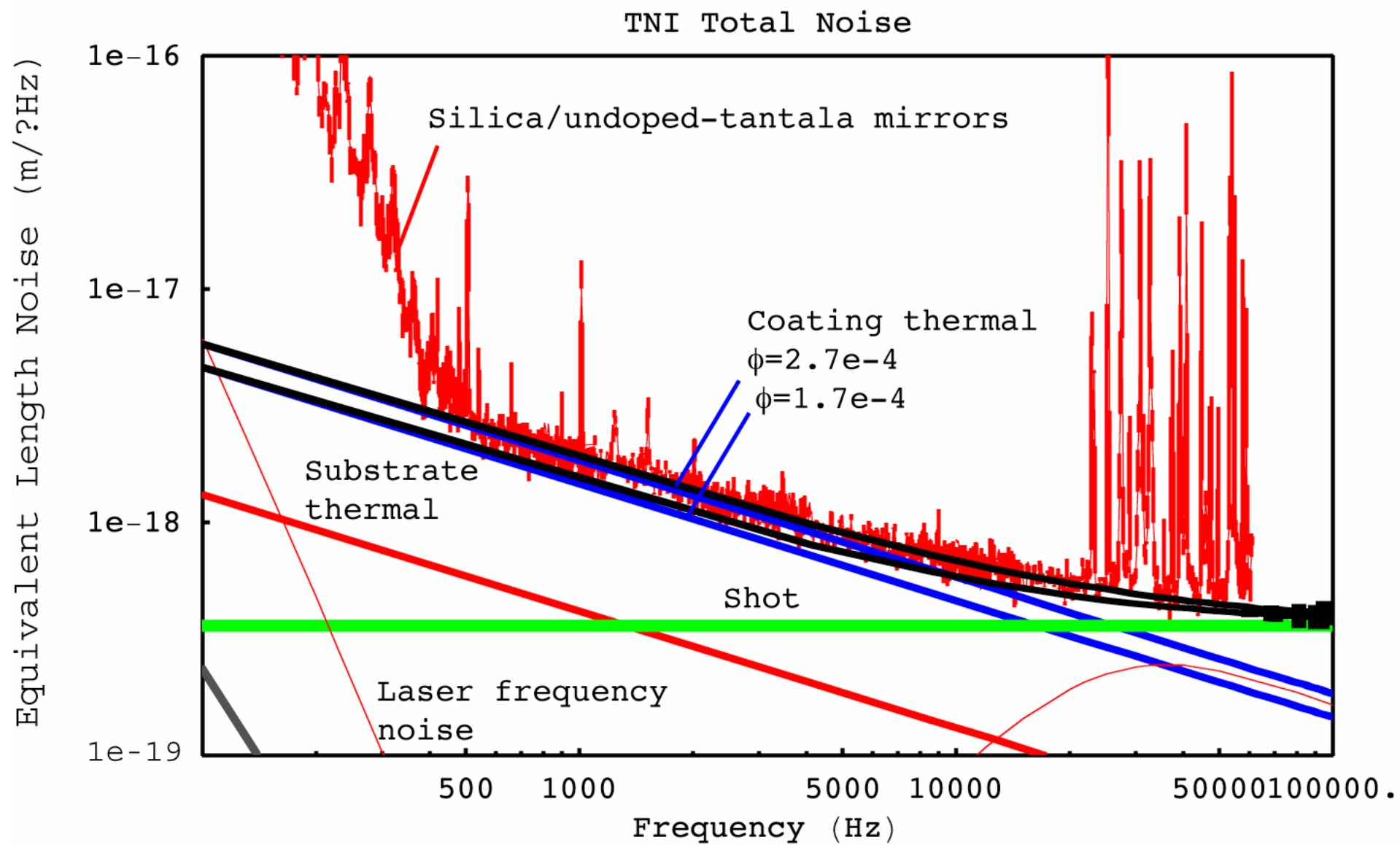
Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory – LIGO (США)

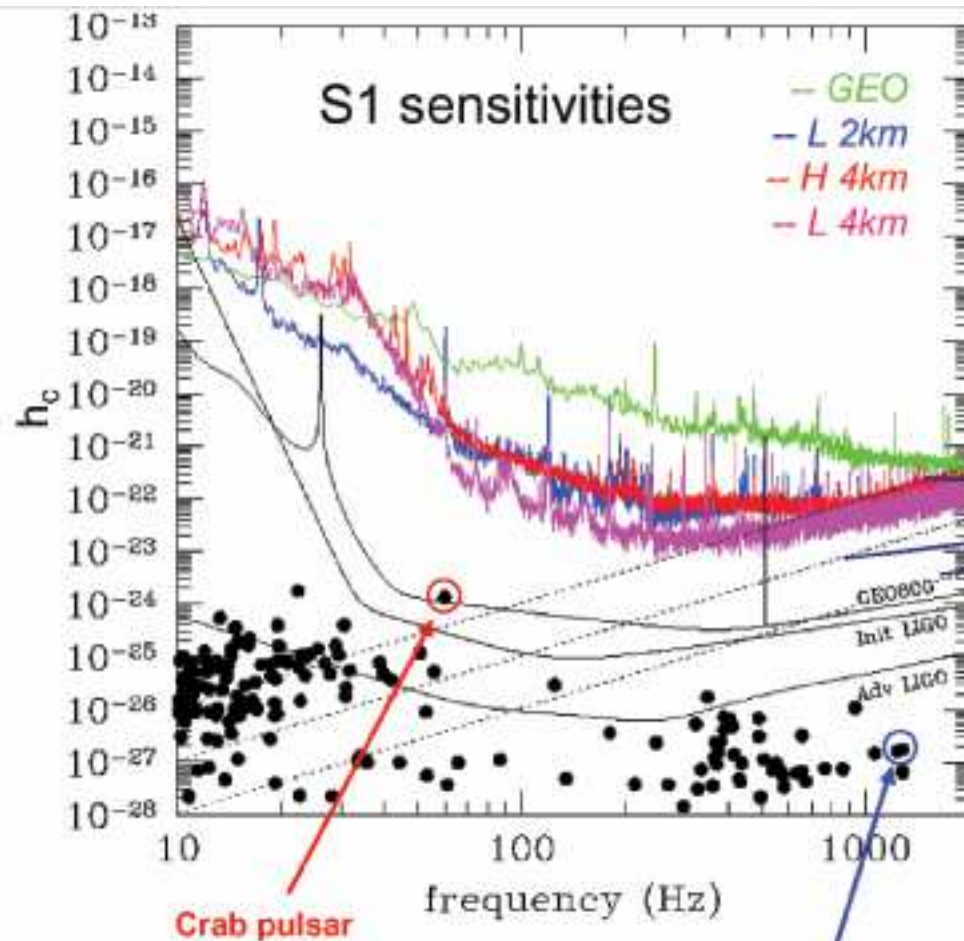
- 1970 – початок робіт над інтерферометричними детекторами
- 1979 NSF фінансує розробку лазерного інтерферометра в Caltech і MIT
- 1990 NSF затверджує проект LIGO
- 1994 початок будівництва в Хенфорді (Вашінгтон) та Лівінгстоні (Луїзіана)
- 1999 кінець будівництва
- 2000 перший спільний запуск з інтерферометрами GEO600 і TAMA300
- 2002 – робочий запуск
- 2010 – зупинка на модернізацію
- 2015 – запуск із десятикратно збільшеною чутливістю

Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory – LIGO (США)

Три інтерферометри: два з плечима по 4 км і один – 2 км.







- h_c : Amplitude detectable with 99% confidence during observation time T :

$$h_c = 4.2 [S_h(f)/T]^{1/2}$$

- Limit of detectability for rotating NS with equatorial ellipticity, $\epsilon = \delta I_{zz}$:

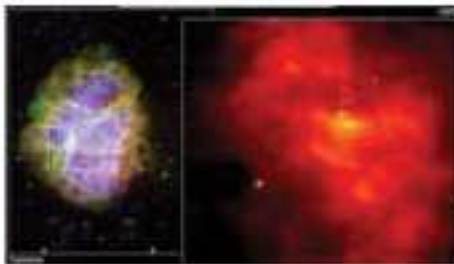
$10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$ @ 10 kpc

- Known EM pulsars

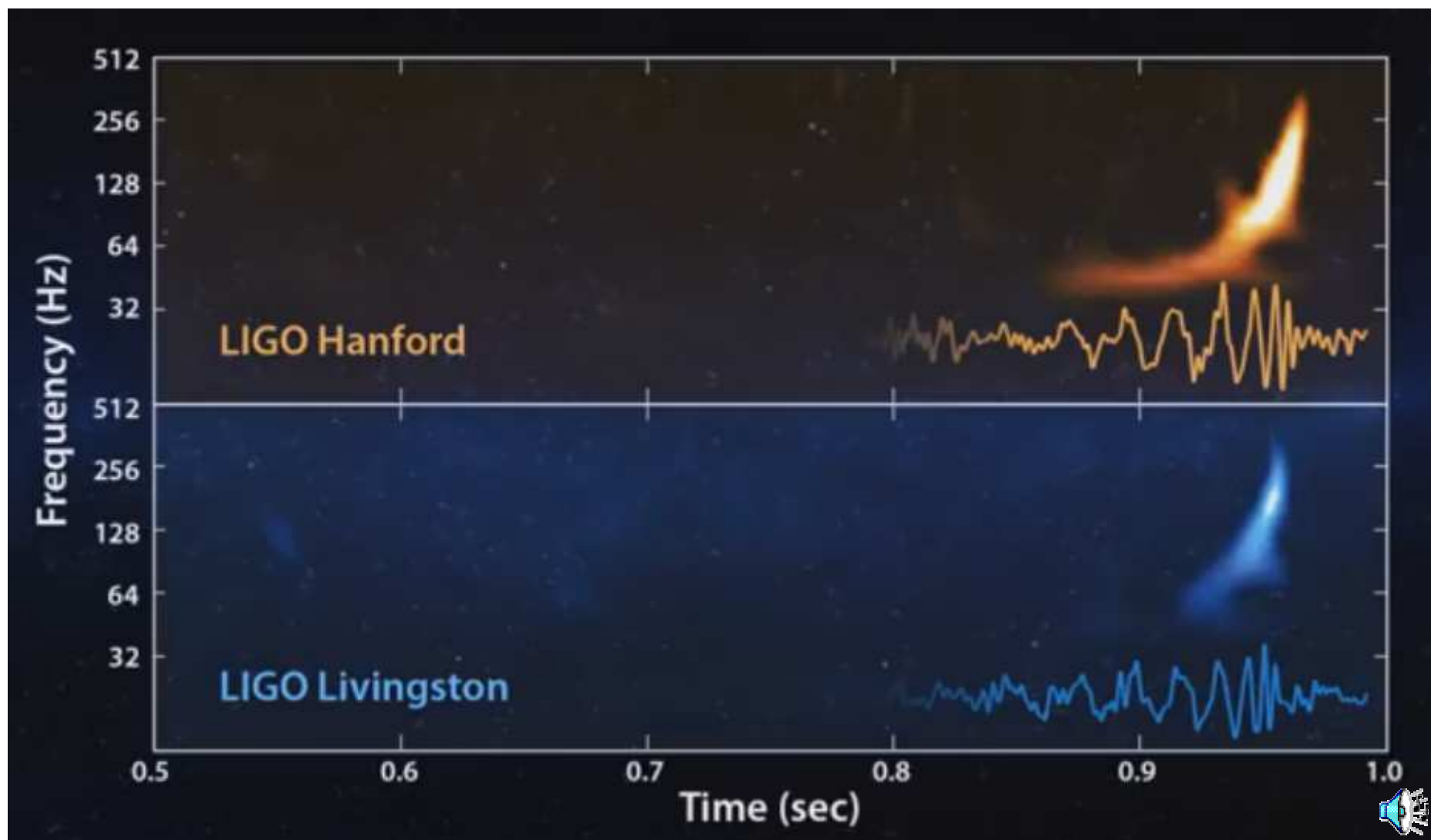
- Values of h_c derived from measured spin-down

- If spin-down were entirely attributable to GW emissions

- Rigorous astrophysical upper limit from energy conservation arguments



September 14, 2015 at 09:50:45 UTC





Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410^{+160}_{-180} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36^{+5}_{-4} M_{\odot}$ and $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$, with $3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

I. INTRODUCTION

In 1916, the year after the final formulation of the field equations of general relativity, Albert Einstein predicted the existence of gravitational waves. He found that the linearized weak-field equations had wave solutions: transverse waves of spatial strain that travel at the speed of light, generated by time variations of the mass quadrupole moment of the source [1,2]. Einstein understood that gravitational-wave amplitudes would be remarkably

The discovery of the binary pulsar system PSR B1913+16 by Hulse and Taylor [20] and subsequent observations of its energy loss by Taylor and Weisberg [21] demonstrated the existence of gravitational waves. This discovery, along with emerging astrophysical understanding [22], led to the recognition that direct observations of the amplitude and phase of gravitational waves would enable studies of additional relativistic systems and provide new tests of general relativity, especially in the dynamic strong-field regime.

Archimandrite Ghosh,¹⁵ S. Ghosh,^{82a} J. A. Giacire,²⁴ K. D. Giardina,⁸ A. Giacotto,¹⁹ K. Gill,⁸⁷ A. Glacbe,³⁶ J. R. Gleason,⁸ E. Goeta,⁸⁸ R. Goeta,⁹ L. Gordon,¹² G. Gonzalez,² J. M. Gonzalez Castro,^{12,10} A. Gopalakrishnan,⁸⁸ N. A. Gordon,¹⁶ M. L. Goodetsky,¹⁰ S. E. Gossan,¹ M. Gosselin,¹¹ R. Gouty,² C. Graf,¹⁰ P. B. Graff,⁴² M. Granata,⁶⁸ A. Grant,¹⁸ S. Gray,¹⁰ C. Gray,¹⁷ G. Greco,^{17,82} A. C. Greco,¹⁰ R. J. S. Greenhalgh,¹⁰⁰ P. Gross,⁵² H. Grosse,¹ S. Grunewald,²⁹ G. M. Guidi,^{12,18} X. Guo,¹⁰ A. Gupta,¹⁴ M. K. Gupta,¹⁰ K. E. Gushwa,¹ E. R. Gustafson,¹ R. Gustafson,¹⁰ J. J. Hacker,²² B. R. Hall,¹⁰ E. D. Hall,¹ G. Hammond,¹⁰ M. Haney,¹⁰ M. M. Hanke,⁵ J. Hanks,¹⁷ C. Hanna,⁷² M. D. Hannan,¹⁰ J. Hanson,¹ T. Hardwick,² J. Harris,^{27,82} G. M. Harry,¹⁰¹ L. W. Harry,²⁸ M. J. Hart,¹⁰ M. T. Hartman,¹ C. J. Haster,¹³ K. Haughton,¹⁰ J. Healy,⁸² J. Heefner,^{1,4} A. Heidmann,⁴⁸ M. C. Heintze,^{3,6} G. Heinzel,¹ H. Heilmann,¹⁴ P. Hello,²⁴ G. Hemming,¹⁴

D. Passolunghi,¹⁰ B. Patrician,¹¹ Z. Patyk,¹² K.L. Pearson,¹³ M. Piana,¹⁴ R. Piana,¹⁵ L. Piskowsky,¹⁶ A. Pol,¹⁷ S. Ponn,¹⁸ A. Porcino,¹⁹ H.P. Pfeiffer,^{20,21} M. Phelps,²² O. Piccini,^{23,24} M. Pichot,²⁵ M. Pickens,²⁶ F. Piergiovanni,^{27,28} V. Piaro,²⁹ G. Pillari,³⁰ L. Pinard,³¹ L.M. Pinto,³² M. Piskin,³³ I.H. Poole,³⁴ R. Pongrac,^{35,36} P. Porceddu,³⁷ A. Post,³⁸

Janely,³⁴ M. Principe,³⁷
M. Pinner,²⁹ H. Qi,¹⁴
Radkins,³⁷ P. Raffai,³⁴
V. Re,²⁹ I. Read,²²
Rucci,^{36,28} K. Rides,³⁰
ma,³⁰ J. D. Romano,³³
Ruggi,³³ K. Ryan,³⁷
L. Sammarti,^{33,31}
B. Sarsalan,⁴⁹
Schilling,^{34,3} J. Schmidt,⁵
ge,^{3,47} B. F. Schatz,^{30,29}
gees,³⁰⁹ C. Seria,²²
I. Shadrin,⁵ Z. Shao,¹
C. Siemens,³⁴ D. Sigg,³⁷
A. M. Sintes,³⁰
Sera,³⁰ F. Serrano,⁴⁷
D. Steinmeyer,^{3,47}
Strauss,³⁴ S. Strigin,³⁰
M. J. Szczepanczyk,³⁷
Taylor,¹ T. Theop,³
Thorne,³⁰ E. Thrane,¹¹⁴
I. Torric,¹ D. Töhr,³⁰
oni,³⁴ D. Tuyenbayev,³⁰
ente,¹ G. Valdes,⁴⁷
D. C. Vander-Hyde,^{30,22}
Smith,³⁰ R. Vardis,³⁰
raro,^{27,30} A. Viceri,^{37,30}
Wos,³ W. D. Vosden,⁴⁹
Wallace,¹ S. Walsh,^{34,28}
M. Was,³ B. Weaver,³⁷
Westphal,³ K. Wette,³
Williams,³⁰ L. Williams,³⁰
chmann,³ W. Winkler,³
Yablon,³² I. Yakushin,³
grinolo,³² M. Zanolin,³⁷
Z. Zhou,³² X. J. Zhu,³⁰

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

¹LIGO, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125, USA

²Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana 70803, USA

³Università di Salerno, Fisciano, I-84084 Salerno, Italy

⁴Università di Napoli, Napoli, I-80126 Napoli, Italy

¹²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 12227-910 São José dos Campos, São Paulo, Brazil

¹³INFN, Gran Sasso Science Institute, I-67100 L'Aquila, Italy

¹⁴INFN, Sezione di Roma Tor Vergata, I-00133 Roma, Italy

¹⁵Inter-University Centre for Astronomy and Astrophysics, Pune, India

¹⁶International Centre for Theoretical Sciences, Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India

¹⁷University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, WI, USA

¹⁸Leningrad University, Leningrad, Russia

¹⁹Università di Pisa, I-56127 Pisa, Italy

²⁰INFN, Sezione di Pisa, I-56127 Pisa, Italy

²¹Australian National University, Canberra, Australian Capital Territory, Australia

²²The University of Mississippi, University, MS, USA

²³California State University Fullerton, Fullerton, CA, USA

²⁴LAL, Université Paris-Sud, CNRS/IN2P3, Université Paris-Saclay, Orsay, France

²⁵University of Southampton, Southampton SO17 9BJ, UK

²⁶University of Hamburg, D-22761 Hamburg, Germany

²⁷INFN, Sezione di Roma, I-00185 Roma, Italy

²⁸Albert-Einstein-Institut, Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, Golm, Germany

²⁹AJC, AstroParticule et Cosmologie, Université Paris Diderot, CNRS, Sorbonne Paris Cité, F-75205 Paris Cedex 13, France

³⁰Montana State University, Bozeman, MT, USA

³¹Università di Perugia, I-06123 Perugia, Italy

³²INFN, Sezione di Perugia, I-06123 Perugia, Italy

³³European Gravitational Observatory (EGO), I-56075 Assisi, Italy

³⁴Syracuse University, Syracuse, NY, USA

³⁵SLPA, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, UK

³⁶LIGO Hanford Observatory, Richland, WA, USA

³⁷Wigner RCP, RMKI, H-1121 Budapest, Konkoly Thege Miklós Str. 1, Hungary

³⁸Columbia University, New York, NY, USA

³⁹Stanford University, Stanford, CA, USA

⁴⁰Università di Padova, Dipartimento di Fisica e Astronomia, I-35131 Padova, Italy

⁴¹INFN, Sezione di Padova, I-35131 Padova, Italy

⁴²CAMK-PAN, 00-716 Warsaw, Poland

⁴³Astronomical Observatory Warsaw University, 00-478 Warsaw, Poland

⁴⁴University of Birmingham, Birmingham B15 2TT, UK

⁴⁵Università degli Studi di Genova, I-16126 Genova, Italy

⁴⁶INFN, Sezione di Genova, I-16126 Genova, Italy

⁴⁷Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁴⁸SLPA, University of the West of Scotland, Paisley PA6 8PU, UK

⁴⁹University of Western Australia, Crawley, Western Australia, Australia

⁵⁰Department of Astrophysics/MAPP, Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Oxon OX11 0QX, UK

⁵¹Armenia, Université Côte d'Azur, CNRS, Observatoire Côte d'Azur, France

⁵²NTA Edinburg University, "Leidsche" Astrophysics Research Centre, The Netherlands

⁵³Institut de Physique de Rennes, CNRS, Université de Rennes, France

⁵⁴Washington State University, Pullman, WA, USA

⁵⁵Università degli Studi di Urbino "Carlo Bo", I-61024 Urbino, Italy

⁵⁶INFN, Sezione di Firenze, I-50019 Sesto Fiorentino, Italy

⁵⁷University of Oregon, Eugene, Oregon, USA

⁵⁸Laboratoire Kastler Brossard, UPMC-Sorbonne Université, CNRS, ENS de Lyon, F-69622 Villeurbanne, France

⁵⁹VU University Amsterdam, 1081 HV Amsterdam, The Netherlands

⁶⁰University of Maryland, College Park, MD, USA

⁶¹Center for Relativistic Astrophysics and School of Physics, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA

⁶²Institut Lumière Matière, Université de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, France

⁶³Laboratoire des Matériaux Avancés (LMA), IN2P3/CNRS, Université de Lyon, France

⁶⁴Università di Pisa, I-56127 Pisa, Italy

⁶⁵Università di Napoli "Federico II", Complesso Universitario di Monte S. Elia, I-80132 Napoli, Italy

⁶⁶NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA

⁶⁷Canadian Institute for Theoretical Astrophysics, University of Toronto, Toronto, Ontario M5S 3H8, Canada

⁶⁸Zhejiang University, Beijing 100084, China

⁶⁹Texas Tech University, Lubbock, Texas 79409, USA

⁷⁰The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania 16802, USA

⁷¹National Tsing Hua University, Hsinchu City, 30013 Taiwan, Republic of China

⁷²Charles Sturt University, Wagga Wagga, New South Wales 2678, Australia

⁷³University of Chicago, Chicago, Illinois 60637, USA

⁷⁴Caltech CalRT, Pasadena, California 91125, USA

⁷⁵Korea Institute of Science and Technology Information, Daejeon 305-380, Korea

⁷⁶Carleton College, Northfield, Minnesota 55057, USA

⁷⁷Università di Roma "La Sapienza", I-00185 Roma, Italy

⁷⁸University of Brussels, Brussels 1050, Belgium

⁷⁹Southern State University, Mohave Park, California 94928, USA

⁸⁰Northwestern University, Evanston, Illinois 60208, USA

⁸¹The University of Texas Rio Grande Valley, Brownsville, Texas 78520, USA

⁸²University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota 55455, USA

⁸³The University of Melbourne, Parkville, Victoria 3010, Australia

⁸⁴The University of Sheffield, Sheffield S10 2TN, United Kingdom

⁸⁵University of Salerno at Benevento, I-82100 Benevento, Italy and INFN, Sezione di Napoli, I-80100 Napoli, Italy

⁸⁶Monclair State University, Montclair, New Jersey 07043, USA

⁸⁷Università di Trento, Dipartimento di Fisica, I-38123 Povo, Trento, Italy

⁸⁸INFN, Trento Institute for Fundamental Physics and Applications, I-38123 Povo, Trento, Italy

⁸⁹Cardiff University, Cardiff CF24 3AA, United Kingdom

⁹⁰National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

⁹¹School of Mathematics, University of Edinburgh, Edinburgh EH9 3FD, United Kingdom

⁹²Indian Institute of Technology, Gandhinagar Ahmedabad Gujarat 382424, India

⁹³Institute for Plasma Research, Bhat, Gandhinagar 382428, India

⁹⁴University of Szeged, Döms út 9, Szeged 6720, Hungary

⁹⁵Embry-Riddle Aeronautical University, Prescott, Arizona 86301, USA

⁹⁶University of Michigan, Ann Arbor, Michigan 48109, USA

⁹⁷Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai 400005, India

⁹⁸Rutherford Appleton Laboratory, HSC, Chilton, Didcot, Oxon OX11 0QX, United Kingdom

⁹⁹American University, Washington, D.C. 20016, USA

¹⁰⁰Rochester Institute of Technology, Rochester, New York 14623, USA

¹⁰¹University of Massachusetts-Amherst, Amherst, Massachusetts 01003, USA

¹⁰²University of Adelaide, Adelaide, South Australia 5005, Australia

¹⁰³West Virginia University, Morgantown, West Virginia 26506, USA

¹⁰⁴University of Jyväskylä, JY-424 Jyväskylä, Finland

¹⁰⁵SLPA, University of Strathclyde, Glasgow G1 1XQ, United Kingdom

¹⁰⁶ISIR-TVM, CEF Campus, Trivandrum Kerala 695015, India

¹⁰⁷Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod, 603950, Russia

¹⁰⁸Pusan National University, Busan 609-735, Korea

¹⁰⁹Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

¹¹⁰NCBI, 05-400 Sułbark-Orzech, Poland

¹¹¹ISI-PAN, 00-956 Warsaw, Poland

¹¹²Monash University, Victoria 3800, Australia

¹¹³Seoul National University, Seoul, Korea

¹¹⁴University of Alabama, Tuscaloosa, AL, USA

¹¹⁵Università di Camerino, Camerino, Italy

¹¹⁶Southern University on College of Wilkes, Wilkes-Barre, PA, USA

¹¹⁷University of Colorado, Boulder, CO, USA

¹¹⁸University of Colorado, Boulder, CO, USA

¹¹⁹Whitman College, Walla Walla, WA, USA

¹²⁰National Institute for Space Research, São José dos Campos, SP, Brazil

¹²⁸Andrews University, Berrien Springs, Michigan 49104, USA

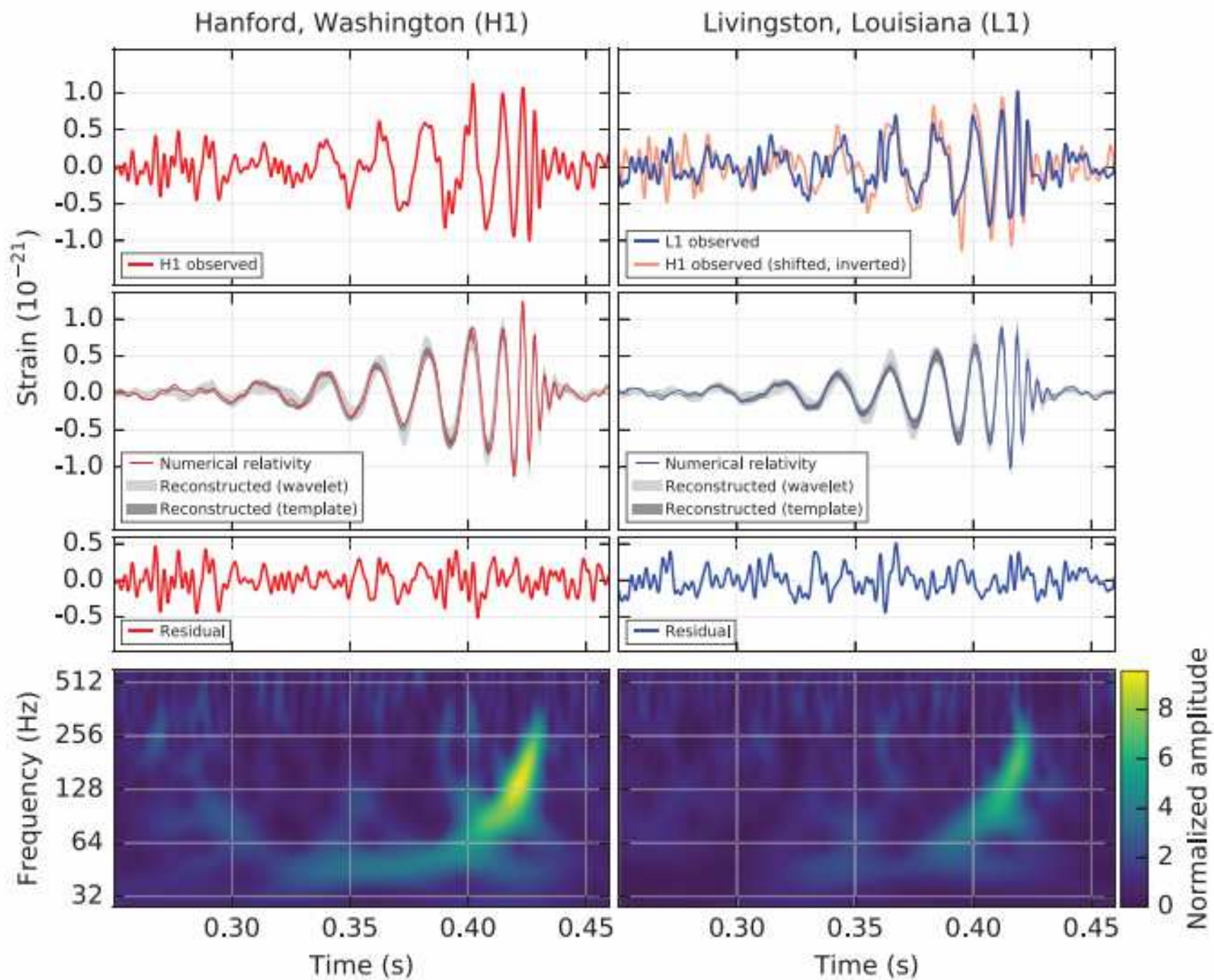
¹²⁹Università di Siena, I-53100 Siena, Italy

¹³⁰Trinity University, San Antonio, Texas 78212, USA

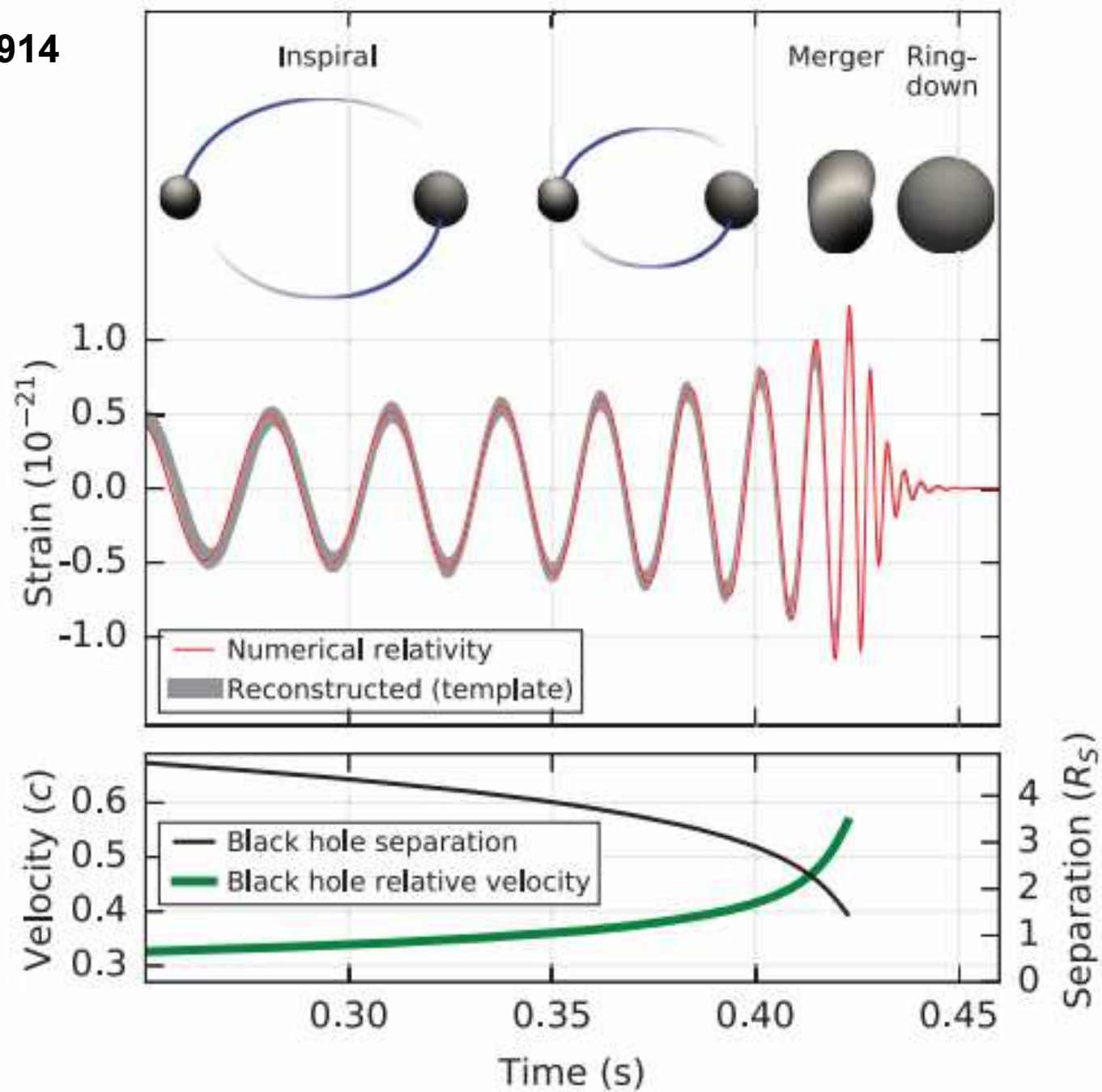
¹³¹University of Washington, Seattle, Washington 98195, USA

¹³²Kenyon College, Gambier, Ohio 43022, USA

¹³³Abilene Christian University, Abilene, Texas 79699, USA



GW150914



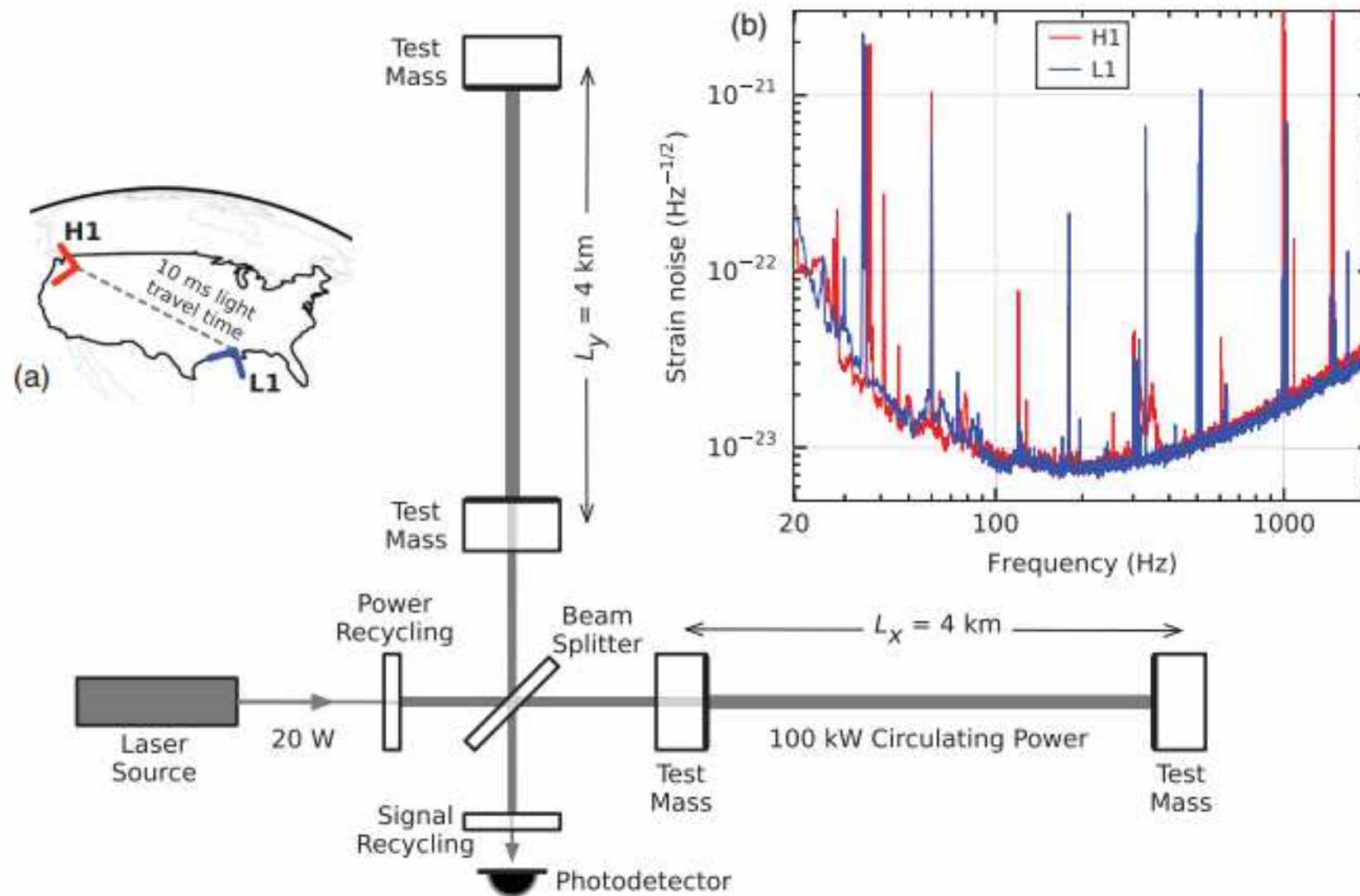
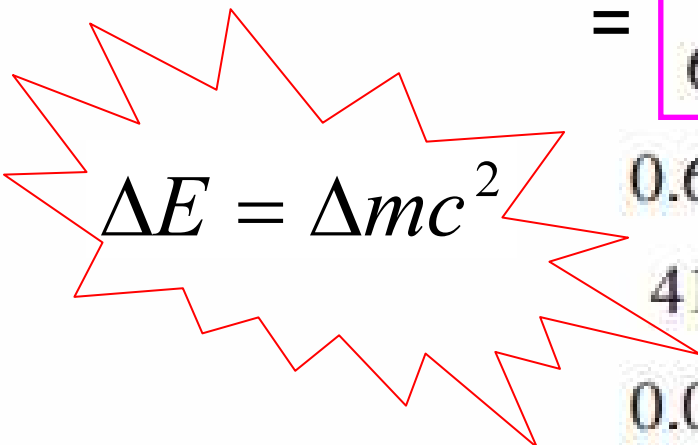


TABLE I. Source parameters for GW150914. We report median values with 90% credible intervals that include statistical errors, and systematic errors from averaging the results of different waveform models. Masses are given in the source frame; to convert to the detector frame multiply by $(1+z)$ [90]. The source redshift assumes standard cosmology [91].

Primary black hole mass	$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67^{+0.05}_{-0.07}$
Luminosity distance	$410^{+160}_{-180} \text{ Mpc}$
Source redshift z	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$



$$\Delta E = \Delta m c^2$$



Kip Thorne

France Córdova

Rainer Weiss

David Reitze

Gabriela González

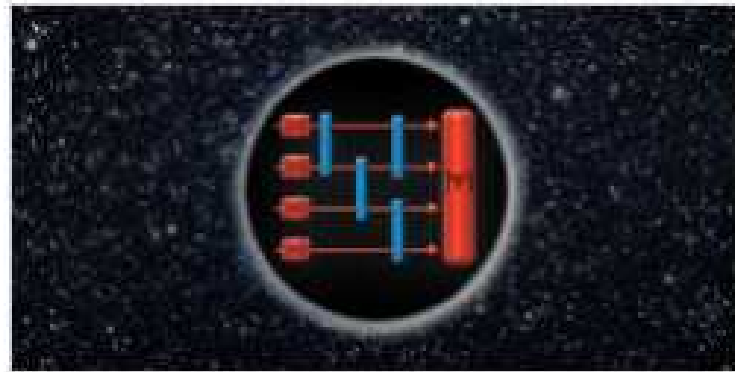
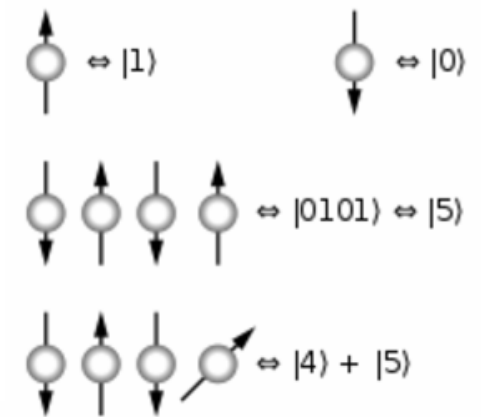


Figure 1: Logic gates (blue) in a quantum circuit (red) act on a small number of qubits. The complexity of the quantum state $|\psi\rangle$ of the qubits can be defined as the number of gates required to produce that state from a simple reference state, chosen here as $|0000\rangle$. Brown and colleagues [1] argue that black hole interiors can be interpreted as quantum circuits that produce complex quantum states at the fastest rate allowed by quantum mechanics.



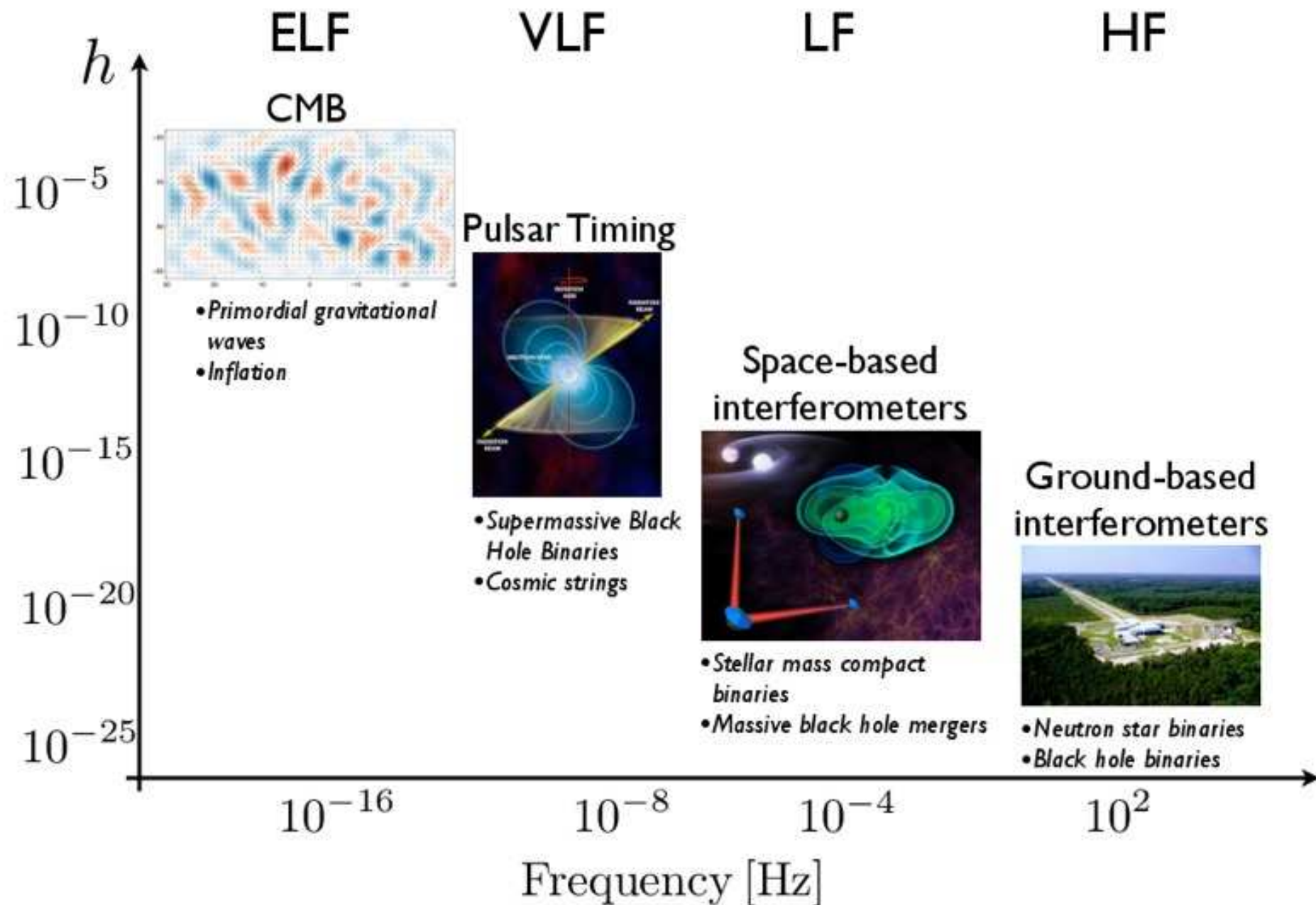
QUANTUM PHYSICS

Viewpoint: Black Holes Produce Complexity Fastest

May 9, 2016

Theoretical results suggest a precise speed limit on the growth of complexity in quantum gravity, set by fundamental laws and saturated by black holes. [Read](#)

The big picture of gravitational wave astronomy



Планований спільний проект ESA та NASA

LISA (Laser Interferometer Space Antenna)

Запуск: **2014р.** —→ 2034 р.

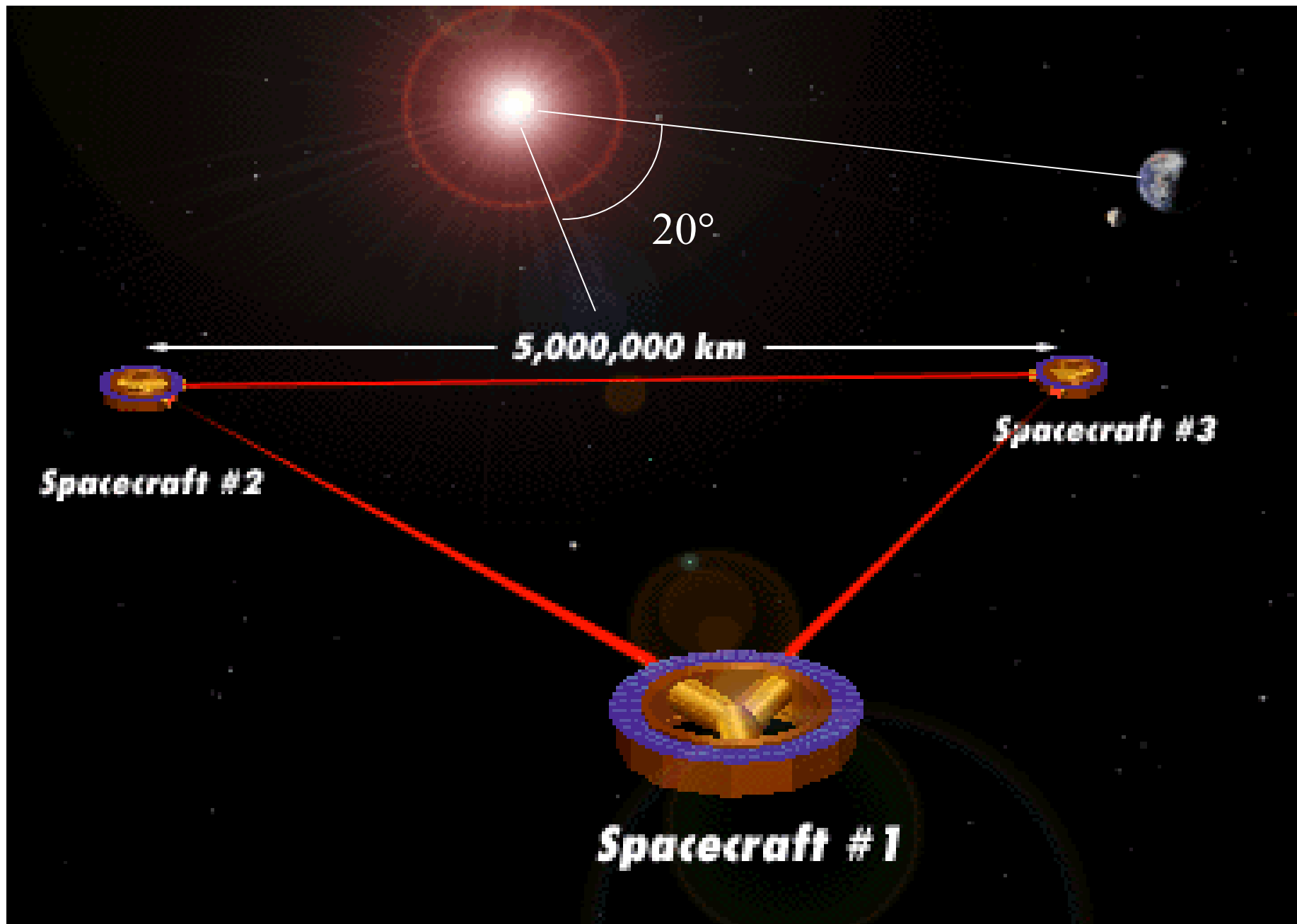
Тривалість: п'ять років

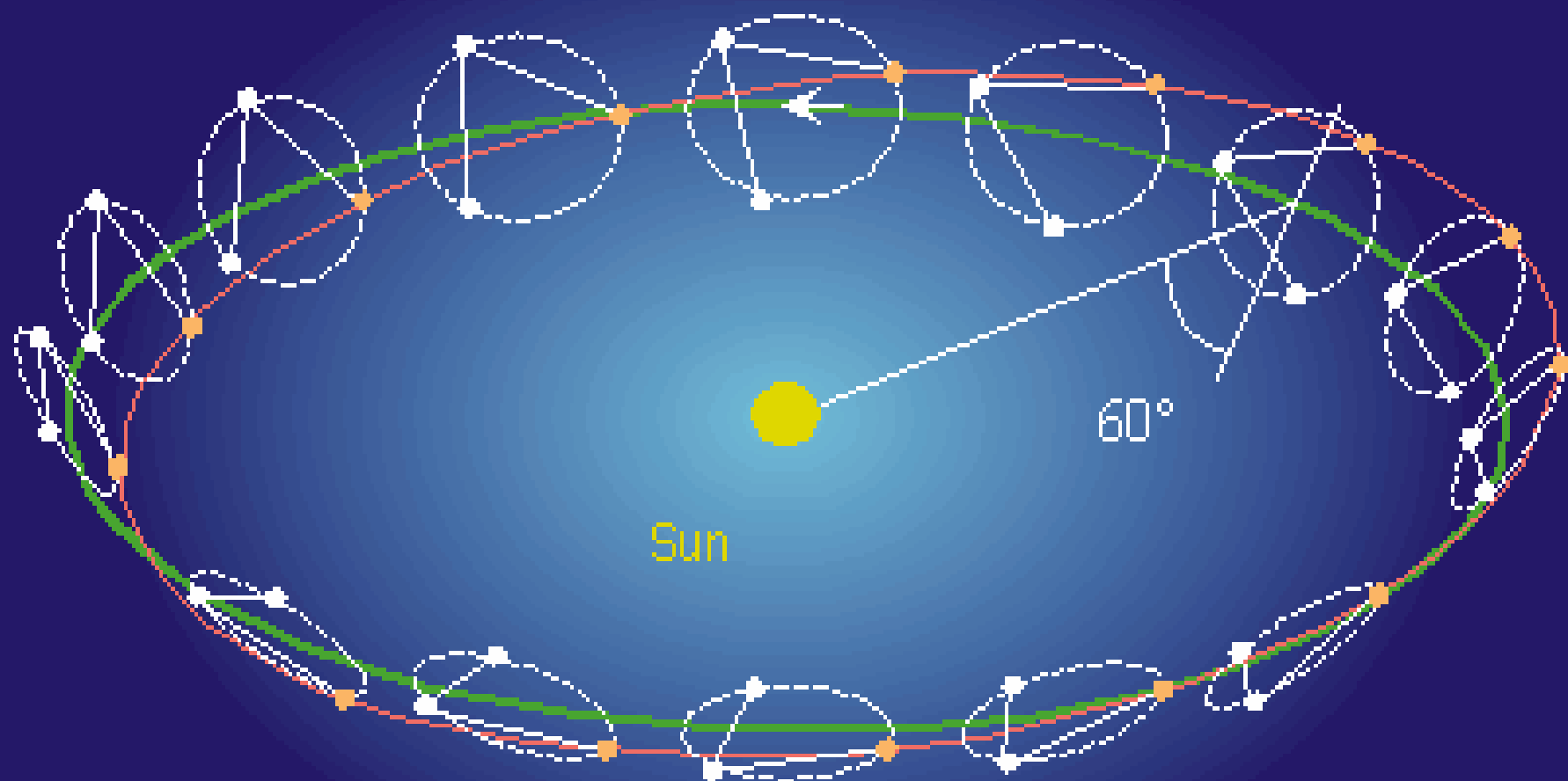
Маса станцій : 1380 кг

Орбіта: земна орбіта, відставання від Землі на 20°

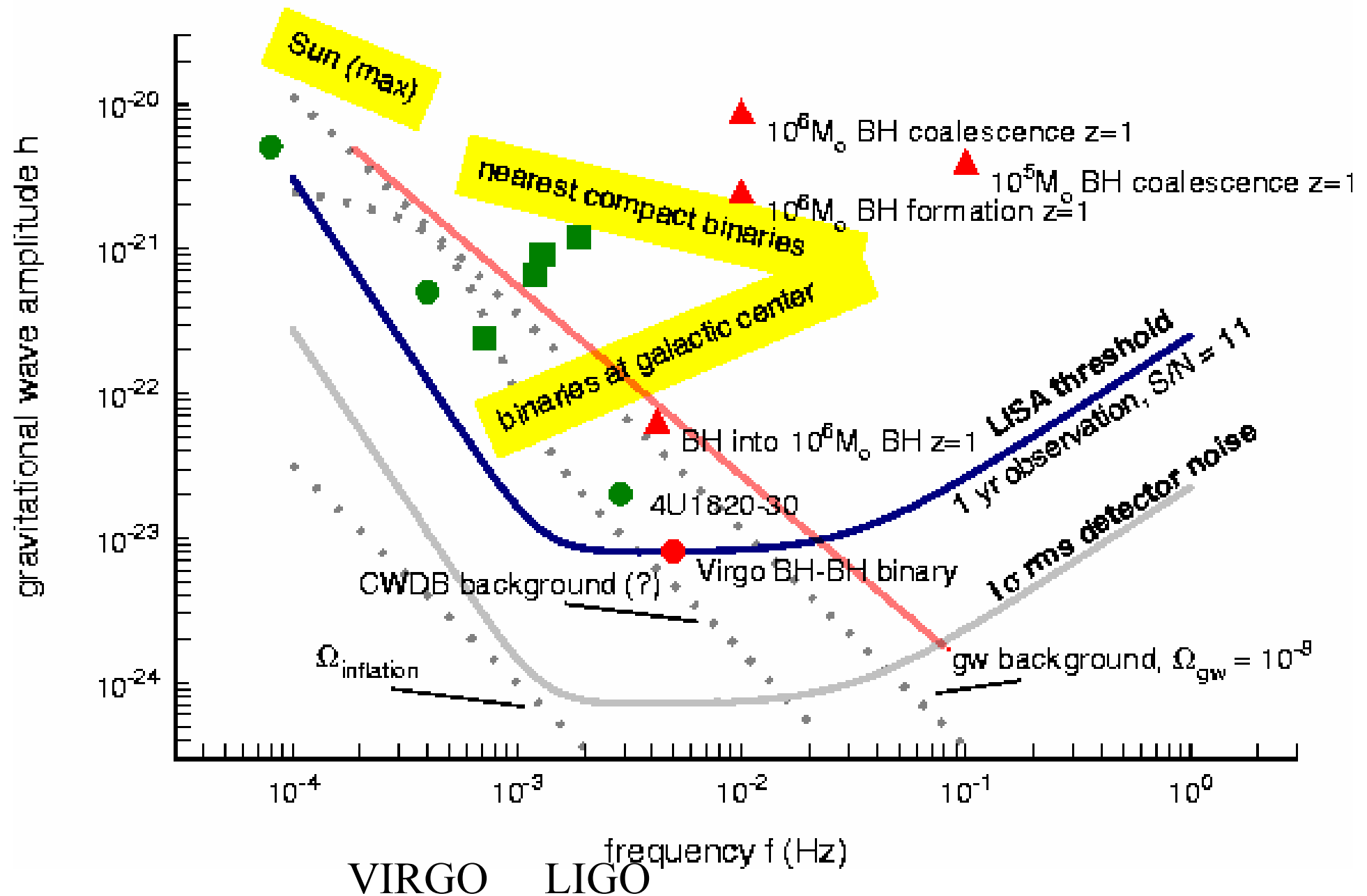
Мета: Виявляти гравітаційні хвилі

Три станції на відстанях 5 мільйонів кілометрів одна від
одної разом утворюють інтерферометр Майкельсона,
вимірюючи затримку променя через скорочення простору
при проходженні гравітаційної хвилі.

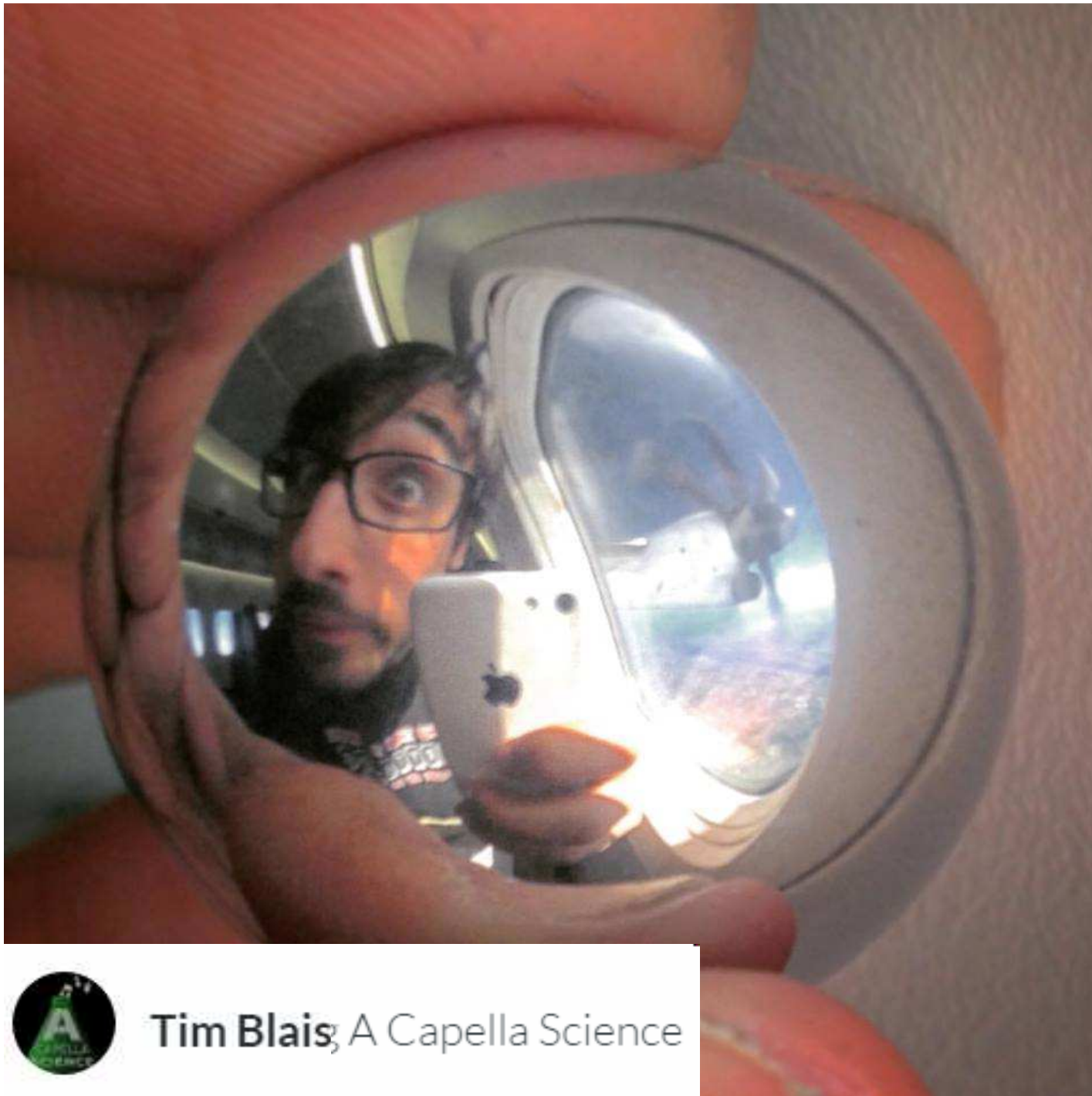




LISA Sensitivity







Tim Blais, A Capella Science

Використані джерела



PHYSICAL REVIEW LETTERS

Physics

europhysicsnews



www.ligo.org/

LIGO
Scientific
Collaboration



www.geo600.org/

IOP A website from the Institute of Physics

physicsworld.com



www.ego-gw.it/

EUROPEAN GRAVITATIONAL OBSERVATORY

The New York Times

<http://nyti.ms/1o6JL4Q>



A Capella Science - Bohemian Gravity!



acapellascience

Підписатися 53 562

2 813 067 переглядів